Los
fascinantes
mundos
invisibles
Manuel de León de la Vega

Con todo mi afecto

a mi esposa, hijos y nietos

# 1. TABLA DE CONTENIDO

## *Contenido*

1. TABLA DE CONTENIDO ..... 5

2. INTRODUCCIÓN ..... 7

3. MUNDOS INVISIBLES DE LA FÍSICA Y EL COSMOS ..... 17

3.1. Las dimensiones ocultas del universo elegante ..... 25

3.2. Materia invisible y universos ocultos ..... 33

3.3. Descubriendo con estupor el mundo. ..... 39

4. MUNDOS INVISIBLES DE LA BIOLOGÍA ..... 45

4.1. El universo invisible de los microbios que nos habitan ..... ..... 51

4.2. El mundo invisible del tiempo profundo y la evolución. ..... ..... 61

12. MUNDOS INVISIBLES DE LA MENTE ..... 65

**4.** ..... 77

5.1. La vida interior, invisible, de la emoción y la conciencia ..... 77

5.2. La música de los números primos ..... 85

5.3. Explorando el Caos y la Complejidad ..... 99

6. MUNDOS INVISIBLES DE LA COMPLEJIDAD ..... 107

**5.** ..... 119

6.1. Bernd-Olaf Küppers y la complejidad ..... 119

6.2. El mundo invisible de lo sagrado ..... 125

6.3. Mundos invisibles interiores (mística, muerte, conciencia) .. 141

6.4. Los enigmas del universo de Haeckel ..... 146

7. REVELANDO ESTRUCTURAS INVISIBLES DEL PASADO ..... 155

7.1. El amanecer de todo ..... 159

7.2. El tiempo: Desde la eternidad hasta hoy ..... 169
7.3. Los agujeros negros ..... 179
8. MUNDOS INVISIBLES QUE SOSTIENEN LO VISIBLE .....
..... 187
8.1. ¿Por qué la vida es como es? ..... 191
8.2. Experiencias cercanas a la muerte ..... 211
8.3. El misterio invisible de la información ..... 223
9. LA TENDENCIA INHERENTE DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS A CREAR ORDEN ..... 229
9.1. Complejidad y autoorganización ..... 237
9.2. Cerebro y pensamiento ..... 248
9.3. El mundo invisible de la célula ..... 261
10. CIENTÍFICOS ESPAÑOLES ENTRE LOS MUNDOS INVISIBLES. 273
10.1. Santiago Ramón y Cajal ..... 277
10.2. Severo Ochoa (1905–1993) ..... 283
10.3. Margarita Salas (1938–2019) ..... 291
11. EPILOGO. ..... 299
12. ANEXO I: La chispa invisible: el electrón ..... 307
13. ANEXO II. El transistor ..... 313
14. ANEXO III El chip. Las nuevas aplicaciones digitales ..... 321

# 2. INTRODUCCIÓN

*"Lo invisible no es lo que no existe, sino lo que hace posible que lo visible exista."*

Todos los días me peleo con las hormigas que campan a sus anchas por mi huerto y con las abejas que madrugan para recoger su polen. Sin embargo, ha habido este año menos de estos insectos que fertilizan las flores de mis tomates y pepinos. Siempre que veo a la hormiga o a la abeja me pregunto: ¿qué percepción tendrán estos sabios y diminutos seres del universo? ¿será que las hormigas creen que su hormiguero y lo que lo rodea es "todo" el cosmos? Me imagino que ellas tienen tal vez una idea muy pobre de él, que es, supongo, la que pueden captar con su pequeña consciencia. Nosotros, los humanos que presumimos de conocer tanto del mundo nos parecemos mucho a esos insectos cuando afirmamos que solo existe lo que ven nuestros ojos o perciben nuestros sentidos ¿Acaso lo que no puede ser percibido por ellos simplemente no existe? Mediante avanzados instrumentos podemos recibir señales, ya sea de mundos microscópicos o macroscópicos, y nos informan de la existencia de un mundo invisible conformado por seres vivos diminutos: parásitos, bacterias, virus o partículas tan pequeñas como los fotones y los cuarks, que ni siquiera nuestra imaginación difícilmente puede captar; o de otros mundos, igualmente invisibles, donde galaxias compuestas por soles, planetas y muchos otros objetos celestes nacen y se disuelven en ciclos enormes de tiempo. Todos esos mundos, micro y macroscópicos, son invisibles a nuestros sentidos normales, pero "aparecen" cuando alguien, a través de estos

instrumentos especiales, logra captar señales o imágenes de esos universos y nos hace conscientes de ellos. Al hacerlo, la humanidad interactúa con ellos y aparecen nuevas formas de conocimiento.

Sin embargo, esto que parece fantástico, al descubrir esos universos invisibles, nos encontramos que están llenos de mayor misterio cuando nos hacemos infinidad de preguntas concretas. Las diminutas hormigas ¿cómo se comunican con tanta rapidez si yo piso una al pasar? Estas hormigas son capaces de inmovilizarse durante unos segundos, en su ruta química invisible, hasta que pase el peligro. Las abejas que repiten la recolección del polen de las flores que están a kilómetros de su colmena ¿cómo se orientan con tanta facilidad? ¿cómo trasmiten a toda la colmena los infinitos lugares donde hay flores? ¿cuál es su GPS? Los microorganismos existían millones de años antes de que la humanidad apareciera sobre la faz de la Tierra. Hemos vivido las consecuencias buenas y malas de esa convivencia, aunque ignoráramos por completo que muchas de nuestras reacciones eran producto de la acción de esos microorganismos. De hecho, el ser humano no podría sobrevivir sin la microbiota, ese conjunto de millones de bacterias que vive en el aparato digestivo y realiza múltiples funciones indispensables para nuestra salud.

Querría entender de este mundo invisible al menos tres grandes modos de comprimir estos misterios que abarcan todas las ciencias y donde en primer lugar lo invisible se exterioriza, se manifiesta por lo visible, esto es, cuando contemplamos la infinita grandeza del universo. En la fenomenología de Mircea Eliade y Rudolf Otto aquí lo invisible no es un “más allá” sino una capa de sentido que se revela en símbolos, ritos, lugares, gestos. En estos autores aparece lo sagrado como otra dimensión del mundo

cotidiano. La hierofanía, la manifestación de lo sagrado en las cosas comunes, lo invisible se deja ver en un objeto visible como un árbol, una flor o un rio. En lo numinoso de Otto lo invisible aparece como experiencia afectiva, como experiencia cuasi religiosa ante lo sagrado. George Bataille en su libro "*La presencia interior*" nos dice que la invisibilidad de la presencia no es distinta en nada de una ausencia. El sentimiento de una ausencia es parecido al sentimiento de una presencia sin poder verla con los ojos. Otra segunda forma sería entender lo invisible como arquitectura sosteniendo lo visible. En física, biología, en la complejidad, en la arqueología profunda, lo invisible es estructura, proceso, microcosmos, tiempo profundo. Es el caso de la biología con sus microbios, células o ADN que es la estructura de la vida. En física serían los campos cuánticos y dimensiones ocultas. Sistemas complejos que emergen sin ser vistos. Por último, nos encontraríamos con la mística, la metafísica, la muerte o la interioridad donde lo invisible no se manifiesta directamente. Aquí lo invisible es interior, trascendente, inaccesible por los sentidos. La conciencia nos hace ver la muerte como tránsito a lo no visible. El alma, el espíritu, la interioridad, estas tres capas nos muestran cómo cada disciplina ilumina un tipo distinto de invisibilidad.

También los mundos ocultos o invisibles se pueden entender desde la filosofía, en la crítica de Nietzsche y Platón. Para Nietzsche, inventar un "mundo invisible" (como el cielo cristiano o las Ideas de Platón) es un síntoma de miedo a la realidad, al dolor y a la muerte. El filósofo alemán afirmaba que el ser humano crea estos mundos ocultos para consolarse, debilitando su capacidad de disfrutar y dominar la única vida real: la terrenal. En la ciencia vemos lo invisible, pero es real y palpable, un mundo oculto que, con microscopios y

otros aparatos, podemos ver con nuestros ojos habitado por bacterias, virus y partículas cuánticas que rigen las leyes de la naturaleza. La física teórica actual (como la teoría de cuerdas) plantea la existencia de dimensiones matemáticas ocultas que no podemos percibir, pero que sostienen el tejido del cosmos. Para Nietzsche el hombre no nace hecho; su gran tarea es inventarse a sí mismo, dar valor a su vida y dejar atrás las imposiciones de la sociedad o la religión. Nietzsche tiene un texto en su libro "*Ecce homo*" lleno de madurez al proponer un espíritu libre que juega con los valores tradicionales, sustituyendo la solemnidad por una plenitud vital y creadora. El mismo Nietzsche lo expresa indicando que profundidad y júbilo van tiernamente unidas de la mano. El texto invita a vivir con una ligereza que trasciende la moral impuesta, desafiando lo sagrado y estableciendo un nuevo sentido de la existencia mediante la parodia y la creación propia. Dice en un párrafo sin puntos aparte:

"Un ideal distinto corre delante de nosotros, un ideal prodigioso, seductor, lleno de peligros, hacia el cual no quisiéremos persuadir a nadie, pues a nadie concedemos fácilmente el derecho a él: el ideal de un espíritu que juega ingenuamente, es decir, sin quererlo y por una plenitud y potencialidad exuberantes, con todo lo que hasta ahora fue llamado santo, bueno, intocable, divino,- un espíritu para quien lo supremo, aquello en que el pueblo encuentra con razón su medida de valor, no significa ya más que peligro, decadencia, rebajamiento o, al menos, distracción, ceguera, olvido temporal de sí mismo; el ideal de un bienestar y de un bienestar a la vez humanos y sobrehumanos, ideal que parecerá inhumano con mucha frecuencia, por ejemplo cuando se sitúa al lado de toda la seriedad terrena habida hasta ahora, al lado de toda la anterior

solemnidad en gestos, palabras, sonidos, miradas, moral y deber, como su viviente parodia involuntaria -y sólo con el cual, a pesar de todo esto, se inicia quizá la gran seriedad, se pone por primera vez el auténtico signo de interrogación, da un giro el destino del alma, avanza la aguja, comienza la tragedia.” Es una frase de las más largas que he leído pero bellísima que conecta perfectamente ese "juego" con la libertad absoluta del espíritu para crear y ver lo invisible.

Otra pregunta que nos surge es si existen dimensiones que no podemos ver. Percibimos el mundo en tres dimensiones, pero eso no significa que sean las únicas. La física teórica propone algo más. Mucho más. Este concepto se conoce como: dimensiones extra, espacio multidimensional. Podrían existir dimensiones ocultas fuera de nuestra percepción. Puede representarse como: Espacio 3D + Extra, lo que vemos…que podría ser solo una parte. Esto implica que no percibimos toda la realidad pues existen niveles ocultos del universo y la física podría extenderse más allá de lo visible. Creemos que el espacio es todo lo que vemos, pero la ciencia sugiere algo distinto. El universo es más grande de lo que puedes imaginar. Sí, la física moderna propone que existen dimensiones adicionales a las tres espaciales que vemos (alto, ancho y profundidad) y el tiempo. Sin embargo, no hay pruebas científicas directas que confirmen su existencia; son predicciones de modelos matemáticos avanzados como la teoría de cuerdas. La teoría de cuerdas o la teoría M calculan que el universo podría tener 10 u 11 dimensiones en total. Una pista que estudian los científicos es por qué la gravedad es tan débil comparada con otras fuerzas; se cree que podría "fugarse" hacia esas dimensiones ocultas. Las teorías sugieren que esas dimensiones extra están enrolladas o "compactificadas" en un

tamaño más pequeño que un átomo, por lo que nuestras herramientas y sentidos no pueden detectarlas. Nuestros ojos y cerebro evolucionaron solo para sobrevivir y moverse en un espacio tridimensional.

Cuando queremos analizar el concepto de cuál es el mundo verdadero, la realidad que percibimos, tenemos que recurrir a otros autores que han dedicado toda su vida a conocer lo que percibimos. El concepto de "mundo verdadero" (un reino de realidad absoluta, perfecta e inmutable en oposición a este mundo físico y cambiante) es uno de los ejes centrales de la historia de la filosofía. Friedrich Nietzsche fue quien más criticó este dualismo, pero muchos otros pensadores lo han analizado, defendido o deconstruido.[1] Para Platón, las cosas que vemos y tocamos en la Tierra son solo copias imperfectas y sombras. La verdadera realidad consiste en *ideas* abstractas, perfectas e inmutables (como la Belleza, la Justicia o el Bien) que existen en un plano metafísico superior. El cristianismo con San Agustín aplicó el concepto de un mundo celestial en la Ciudad de Dios absorbiendo el platonismo. Trasladó el "mundo verdadero" a la vida eterna junto a Dios. Este mundo terrenal se convirtió en un lugar de paso, pecado e ilusión, mientras que la salvación divina representa la llegada a la realidad auténtica y perfecta.

Immanuel Kant consideró el mundo inaccesible, como el Noúmeno (la "cosa en sí"), la realidad tal como es en sí misma, independiente de cómo la percibimos. Kant dividió la realidad en dos. El *Fenómeno* es el mundo tal como lo percibimos a través de nuestros sentidos y mente. El *Noúmeno* es el mundo tal como es en sí mismo, la "verdadera realidad". La conclusión de Kant es radical:

[1] *El crepúsculo de los ídolos*. Friedrich Nietzsche.

el mundo verdadero existe, pero es completamente imposible de conocer para el ser humano. Arthur Schopenhauer consideró el mundo como Voluntad. Basándose en Kant, Schopenhauer afirmó que el mundo físico que vemos es solo una ilusión (el "Velo de Maya"[2]). Detrás de esa apariencia, el "mundo verdadero" es una fuerza ciega, irracional e insaciable que lo mueve todo, a la que llamó Voluntad. Por tanto, Schopenhauer cambia el enfoque y ve la voluntad como la esencia misma de la realidad. El mundo que vemos es solo una ilusión o representación; por dentro, todo está impulsado por una voluntad de vivir ciega, irracional y fuente de dolor. Karl Marx dio un giro materialista viendo la realidad en las condiciones materiales y socioeconómicas variando a los filósofos anteriores. Para él, buscar un "mundo verdadero" en el cielo o en las ideas es una alienación (ideología o religión) que funciona como un calmante para soportar el sufrimiento. El único mundo real y verdadero es el mundo material, social y económico que los humanos transforman con su trabajo.

En su obra *El crepúsculo de los ídolos* (1889), Friedrich Nietzsche dedica un famoso y breve capítulo titulado **"***Cómo el 'mundo verdadero' terminó convirtiéndose en una fábula***"**. En solo una página, traza una cronología de seis etapas donde narra cómo la humanidad inventó un mundo perfecto para despreciar la realidad tangible, y cómo finalmente se liberó de esa ilusión. Estas serían las seis etapas de la historia de un error o la deconstrucción paso a paso de esa historia**.** La forma más antigua es la de Platón donde **e**l mundo verdadero es accesible al sabio, al piadoso, al virtuoso. Él vive en ese

[2] El "velo de Maya" es un concepto central en la filosofía de Arthur Schopenhauer tomado del hinduismo y budismo. Representa la ilusión: el mundo de los fenómenos, el espacio y el tiempo que percibimos a diario.

mundo, *él es ese mundo*. El filósofo se cree el poseedor de la verdad absoluta. La realidad está aquí para quien sea lo suficientemente inteligente. El cristianismo abrazaría la idea de que el mundo verdadero es inalcanzable por ahora, pero está prometido al sabio, al piadoso, al virtuoso ("al pecador que hace penitencia") otro mundo celestial. La verdad se vuelve sublime, lejana y femenina. Ya no se alcanza en vida, sino en el más allá (el Paraíso). Otra etapa sería la duda de Kant. Para él, el mundo verdadero es inalcanzable, indemostrable, imprevisible, pero ya el mero hecho de pensarlo es un consuelo, una obligación. Kant saca el "mundo verdadero" del mapa del conocimiento. Sigue ahí como un fantasma moral para asustar o consolar, pero es inaccesible**.**

Otro peldaño sería el pálido amanecer del Positivismo / Escepticismo). El mundo verdadero ¿inalcanzable? En todo caso, no alcanzado. Y por ser no alcanzado, también *desconocido*. Por tanto, tampoco consuela ni obliga. La ciencia y el escepticismo despiertan. Si no podemos conocer ese mundo, ¿para qué preocuparnos por él? Empieza a oler a rancio. Otra forma de ver el mundo sería el ser humano con el espíritu libre**.** El "mundo verdadero", una idea que ya no sirve para nada, que ya ni siquiera obliga, una idea inútil, superflua; por consiguiente, una idea refutada: ¡eliminémosla! El pensamiento se libera de la pesadez metafísica. Se abre la ventana y entra aire fresco. El "mundo verdadero" se descarta por inútil. Y por último la culminación (Zaratustra / Nietzsche). Hemos eliminado el mundo verdadero: ¿qué mundo ha quedado?, ¿el aparente quizá?... ¡No! *¡Al eliminar el mundo verdadero hemos eliminado también el aparente!* El dualismo desaparece. Si ya no existe un mundo "perfecto" con el cual comparar y rebajar a este mundo físico, este mundo ya no es "aparente". Es el único que existe. Nietzsche no

busca cambiar un mundo por otro. Su objetivo es *destruir el dualismo.* Al demostrar que el "mundo verdadero" es una fábula inventada por miedo al cambio, al sufrimiento y a la muerte, rescata el valor del cuerpo, de los sentidos y de la vida terrenal. La realidad ya no es una copia imperfecta de nada; es la totalidad de lo que hay. Es lo mismo que dicen en mi pueblo: ¡Pero si lo estás viendo, lo puedes tocar¡

Consideraremos más adelante los mundos invisibles de la física y el cosmos. Mundos invisibles de la biología, de la mente, de las matemáticas, mundos espirituales, simbólicos y religiosos, mundos invisibles del pasado y los mundos invisibles de la complejidad. Sin embargo, he de aclarar de nuevo que estos mundos se hacen visibles a nuestros ojos cuando tenemos instrumentos adecuados para verlos y por tanto muchos de los infinitos misterios del universo nunca podremos verlos. Entraremos en un nuevo territorio, donde ya entraron Eliade y Otto trabajando en mundos invisibles que emergen del visible, es decir, lo invisible como estructura, sentido, presencia, hierofanía que se manifiesta en lo sensible. Mundos invisibles que sostienen lo visible (ciencia, complejidad, microcosmos). Mundos invisibles interiores (mística, muerte, conciencia). Resumiendo, lo invisible no es un “más allá”: es la dimensión profunda del mundo, aquello que sostiene, estructura, ilumina o desborda lo visible.

# 3. MUNDOS INVISIBLES DE LA FÍSICA Y EL COSMOS

Toda nuestra ciencia, comparada con la realidad, es primitiva e infantil… y sin embargo es lo más preciado que tenemos.

**ALBERT EINSTEIN (1879-1955)**

Carl Edward Sagan **(**1934.1996) escribió "*El mundo y sus demonios"* libro de divulgación crítica sobre lo que no vemos: fuerzas, creencias, sesgos, ciencia como linterna. Fue un defensor del pensamiento *escéptico científico* y del método científico, pionero de la exobiología (vida fuera de la Tierra), promotor de la búsqueda de inteligencia extraterrestre a través del proyecto SETI. Impulsó el envío de mensajes a bordo de sondas espaciales, destinados a informar a posibles civilizaciones extraterrestres acerca de la cultura humana. Dice Sagan "La ciencia origina una gran sensación de prodigio. Pero la pseudociencia también. Las popularizaciones dispersas y deficientes de la ciencia dejan unos nichos ecológicos que la pseudociencia se apresura a llenar. Si se llegara a entender

ampliamente que cualquier afirmación de conocimiento exige las pruebas pertinentes para ser aceptada, no habría lugar para la pseudociencia. Pero, en la cultura popular, prevalece una especie de ley de Gresham según la cual la mala ciencia produce buenos resultados. En todo el mundo hay una enorme cantidad de personas inteligentes, incluso con un talento especial, que se apasionan por la ciencia. Pero no es una pasión correspondida. Los estudios sugieren que un noventa y cinco por ciento de los americanos son «analfabetos científicos». Es exactamente la misma fracción de afroamericanos analfabetos, casi todos esclavos, justo antes de la guerra civil, cuando se aplicaban severos castigos a quien enseñara a leer en la oscuridad."

En el libro citado *El mundo y sus demonios* (1995), Sagan ejemplifica la falacia del argumento especial con ejemplos exclusivamente religiosos:

"Un argumento especial, a menudo para salvar una proposición en un problema retórico profundo (p. ej.: ¿Cómo puede un Dios compasivo condenar al tormento a las generaciones futuras porque, contra sus órdenes, una mujer indujo a un hombre a comerse una manzana? No entiendes la sutil doctrina del libre albedrío- te dirán-. O ¿cómo puede haber un Padre, Hijo y Espíritu Santo igualmente divinos en la misma persona? Argumento especial es que no entiendes el misterio divino de la Santísima Trinidad. O: ¿cómo podía permitir Dios que los seguidores del judaísmo, cristianismo e islam —obligados cada uno a su modo a medidas heroicas de amabilidad afectuosa y compasión— perpetraran tanta crueldad durante tanto tiempo? Te dirán: otra vez no entiendes el libre albedrío. Y, en todo caso, los caminos de Dios son misteriosos). En 1996, en respuesta a una pregunta acerca de sus creencias religiosas, Sagan contestó:

Soy agnóstico. El punto de vista de Sagan sobre la religión ha sido interpretado como una forma de panteísmo comparable a la creencia de Einstein en el Dios de Spinoza. Sagan sostenía que la idea de un creador del universo era difícil de probar o refutar, y que el único descubrimiento científico que podría desafiarla sería el de un universo infinitamente viejo. Según su última esposa, Ann Druyan, Sagan no era creyente. En el año 1985, se publicó un libro de conferencias sobre "*La diversidad de la ciencia*" una visión personal de la búsqueda de Dios, en el que el astrónomo expone su punto de vista sobre la divinidad en el mundo natural.

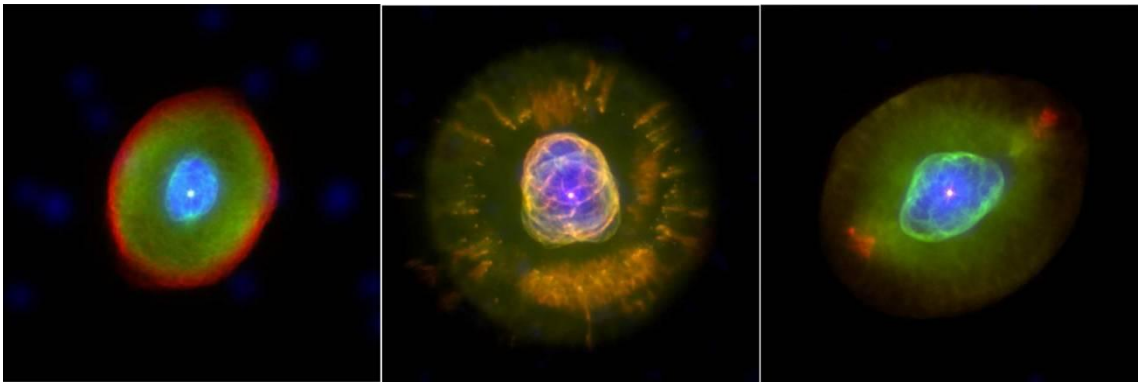
Aclara Sagan que la palabra «religión» proviene del latín *religatio*, reunir, juntar lo que ha sido separado. Es un concepto muy interesante y, en lo que respecta a buscar el vínculo más profundo entre cosas que superficialmente parecen estar separadas, creo que los objetivos de la religión y la ciencia son idénticos o casi. Pero la cuestión tiene que ver con *la fiabilidad de las verdades proclamadas* por ambos campos y los respectivos métodos de aproximación a las mismas. Una de las mejores formas que conozco de experimentar el sentimiento religioso, la sensación de sobrecogimiento, es, con mucho, mirar hacia arriba en una noche clara. Creo que es muy difícil saber quiénes somos hasta que entendemos dónde estamos y cuándo. Creo que todo el mundo, en cualquier cultura, ha sentido sobrecogimiento y estupor al mirar al cielo, y eso se refleja tanto en la ciencia como en la religión. Thomas Carlyle dijo que maravillarse es la base de la adoración. Y Albert Einstein aseveró: «Creo que el sentimiento religioso cósmico es el estímulo más fuerte y más noble para la investigación científica.» Así pues, si Carlyle y Einstein pudieron estar de acuerdo en algo, hay una modesta posibilidad de que pueda ser cierto. Aquí tenemos las Pléyades, una serie de

estrellas jóvenes recién nacidas y que todavía aparecen envueltas en sus capullos de gas y polvo estelar. Ésta es una de las muchas nebulosas, grandes nubes de gas y polvo interestelar. Lo que vemos aquí es una salpicadura de estrellas en primer plano, y detrás de

***Las Pléyades***

ellas, una nube resplandeciente de hidrógeno interestelar: se trata de la materia roja. Los trazos oscuros no indican ausencia de estrellas, sino una región en la que la materia oscura nos impide ver las estrellas que hay detrás. Es en densas concentraciones de esta materia oscura interestelar donde se encuentran en proceso de gestación nuevas estrellas y, como empezamos a saber ahora, también nuevos sistemas planetarios.

La Nebulosa del Esquimal (catalogada oficialmente como NGC 2392) es una nebulosa planetaria bipolo situada a unos 4.000 o 5.000 años luz de la Tierra en la constelación de Géminis. Descubierta por William Herschel en 1787, debe su nombre popular a que su forma



recuerda a una cara humana envuelta en una capucha de piel. Hace 10.000 años, esta aureola de gas y polvo formaba parte de la estrella central. La estrella moribunda expulsó entonces sus capas exteriores hacia el espacio en estallidos sucesivos, formando lo que los astrónomos llaman una nebulosa planetaria. Todas las estrellas ordinarias, como el Sol, tendrán finalmente un destino similar.

Estos libros de Sagan, como gran divulgador, se leen con mucha facilidad, aunque toque temas difíciles para los no somos entendidos. Para explicar el mundo de los microbios nos señala que “la práctica médica premoderna no logró salvar a muchos ni siquiera en su mejor momento. La reina Ana fue la última Estuardo de Gran Bretaña. En los últimos diecisiete años del siglo XVII se quedó embarazada dieciocho veces. Sólo cinco niños le nacieron vivos. Sólo uno sobrevivió a la infancia. Murió antes de llegar a la edad adulta y antes de la coronación de la reina en 1702. No parece haber ninguna prueba de trastorno genético. Contaba con los mejores cuidados médicos que se podían comprar con dinero. Destaca Sagan a este respecto que mientras en el mundo islámico florecía la

medicina, en Europa se entró realmente en una edad oscura. Se perdió la mayor parte del conocimiento de anatomía y cirugía. Abundaba la confianza en la oración y las curaciones milagrosas. Desaparecieron los médicos seculares. Se usaban ampliamente cánticos, pociones, horóscopos y amuletos. Se restringieron o ilegalizaron las disecciones de cadáveres, lo que impedía que los que practicaban la medicina adquirieran conocimiento de primera mano del cuerpo humano. La investigación médica llegó a un punto muerto.

Era muy parecido a lo que el historiador Edward Gibbon describió para todo el Imperio oriental, cuya capital era Constantinopla: “En el transcurso de diez siglos no se hizo ni un solo descubrimiento que exaltara la dignidad o promoviera la felicidad de la humanidad. No se había añadido ni una sola idea a los sistemas especulativos de la antigüedad y toda una serie de pacientes discípulos se convirtieron en su momento en los maestros dogmáticos de la siguiente generación servil”. En *La genealogía de la moral*, Friedrich Nietzsche, como tantos antes y después, critica el «progreso ininterrumpido en la autodesvalorización del hombre» causado por la revolución científica. Nietzsche lamenta la pérdida de la «creencia del hombre en su dignidad, su unicidad, su insustituibilidad en el esquema de la existencia». Para mí -dice Sagan- es mucho mejor captar el universo como es en realidad que persistir en el engaño, por muy satisfactorio y reconfortante que sea. ¿Qué actitud es la que nos equipa mejor para sobrevivir a largo plazo? ¿Qué nos da una mayor influencia en nuestro futuro? Y si nuestra ingenua autoconfianza queda un poco socavada en el proceso, ¿es tan grande la pérdida, en realidad? ¿No hay motivo para darle la bienvenida como una experiencia que hace madurar e imprime carácter? Descubrir que el universo tiene de ocho mil a

quince mil millones de años y no de seis mil a doce mil mejora nuestra apreciación de su alcance y grandeza; mantener la idea de que somos una disposición particularmente compleja de átomos y no una especie de hálito de divinidad, aumenta cuando menos nuestro respeto por los átomos; descubrir, como ahora parece posible, que nuestro planeta es uno de los miles de millones de otros mundos en la galaxia de la Vía Láctea y que nuestra galaxia es una entre miles de millones más, agranda majestuosamente el campo de lo posible; encontrar que nuestros antepasados también eran los ancestros de los monos nos vincula al resto de seres vivos y da pie a importantes reflexiones —aunque a veces lamentables— sobre la naturaleza humana.

Pero la superstición y la pseudociencia no dejan de interponerse en el camino para distraer a todos los «William F. Buckley. » que hay entre nosotros, proporcionar respuestas fáciles, evitar el escrutinio escéptico, apelar a nuestros temores y devaluar la experiencia, convirtiéndonos en practicantes rutinarios y cómodos además de víctimas de la credulidad. Sí, el mundo sería más interesante si hubiera ovnis al acecho en las aguas profundas de las Bermudas tragándose barcos y aviones, o si los muertos pudieran hacerse con el control de nuestras manos y escribirnos mensajes. Sería fascinante que los adolescentes fueran capaces de hacer saltar el auricular del teléfono de su horquilla sólo con el pensamiento, o que nuestros sueños pudieran predecir acertadamente el futuro con mayor asiduidad que la que puede explicarse por la casualidad y nuestro conocimiento del mundo". Cita con mucho humor a un Buckley que se llamaba igual que un escritor y comentarista conservador estadounidense, pero este "Buckley" creía saber de ciencia, pero toda la ciencia había sido expurgada antes de llegar a

él. A este hombre le habían fallado nuestros recursos culturales, nuestro sistema educativo, nuestros medios de comunicación. Lo que la sociedad permitía que se filtrara eran principalmente apariencias y confusión. Nunca le habían enseñado a distinguir la ciencia real de la burda imitación. No sabía nada del funcionamiento de la ciencia.

La pseudociencia es distinta de la ciencia errónea, -explica muy bien Sagan-. La ciencia avanza con los errores y los va eliminando uno a uno. Se llega continuamente a conclusiones falsas, pero se formulan hipotéticamente. Se plantean hipótesis de modo que puedan refutarse. Se confronta una sucesión de hipótesis alternativas mediante experimento y observación. La ciencia anda a tientas y titubeando hacia una mayor comprensión. Desde luego, cuando se descarta una hipótesis científica se ven afectados los sentimientos de propiedad, pero se reconoce que este tipo de refutación es el elemento central de la empresa científica. En la pseudociencia pretenden utilizar métodos y descubrimientos de la ciencia, mientras que en realidad son desleales a su naturaleza, a menudo porque se basan en pruebas insuficientes o porque ignoran claves que apuntan en otra dirección. *Están infestados de credulidad*. Con la cooperación desinformada (y a menudo la connivencia cínica) de periódicos, revistas, editores, radio, televisión, productores de cine y similares, esas ideas se encuentran fácilmente en todas partes. Mucho más difíciles de encontrar, como pude constatar en mi encuentro con el señor «Buckley», son los descubrimientos alternativos más desafiantes e incluso más asombrosos de la ciencia.

## 3.1. Las dimensiones ocultas del universo elegante

Durante los últimos treinta años de su vida, Albert Einstein buscó incesantemente lo que se llamaría una teoría unificada de campos, es decir, una teoría capaz de describir las fuerzas de la naturaleza dentro de un marco único, coherente y que lo abarcase todo. Einstein nunca consiguió hacer realidad su sueño. Y, actualmente, mucho después de que Einstein planteara su búsqueda de una teoría unificada y acabara con las manos vacías, los físicos

creen que han hallado por fin un marco en el que se pueden encajar esos temas, en un sistema completo y sin costuras: una teoría única que, en principio, es capaz de describir todos los fenómenos físicos. Esta teoría, la teoría de las supercuerdas, es el tema de este libro de Greene. Brian Greene[3] escribe sobre las dimensiones ocultas, la teoría de las cuerdas y la estructura profunda del espacio-tiempo. *La teoría de las supercuerdas* genera una amplia red de recursos. Se trata de un tema amplio y profundo que inspira muchos de los descubrimientos cruciales de la física. Dado que esta teoría unifica las leyes de lo grande y de lo pequeño, es decir, las leyes que gobiernan la física cuando nos trasladamos hasta los rincones más lejanos del cosmos y cuando descendemos hasta la partícula más diminuta de la materia, existen muchos caminos para aproximarse a este tema.

He optado -explica Brian- por centrarme en la evolución de nuestro modo de comprender el espacio y el tiempo. Creo que ésta es una vía especialmente atractiva para desarrollar el tema, ya que realiza un corte rico y fascinante a través de las teorías nuevas y esenciales. Einstein mostró al mundo que el espacio y el tiempo se comportan de maneras asombrosamente poco corrientes. Actualmente, la investigación más avanzada ha integrado sus descubrimientos en un universo cuántico que posee numerosas dimensiones ocultas entrelazadas en el tejido del cosmos —dimensiones cuya geometría profusamente entrelazada tiene muchas probabilidades de contener la clave de algunas de las cuestiones más difíciles que se han planteado jamás—. Aunque algunos de estos conceptos son bastante sutiles, veremos que es

[3] *El universo elegante*. Brian Greene

posible captarlos mediante analogías con cuestiones muy cercanas. Brian nos despeja la cuestión de la física moderna así:

"El problema es el siguiente: existen dos pilares fundamentales en los que se apoya la física moderna. Uno es la relatividad general de Albert Einstein, que proporciona un marco teórico para la comprensión del universo a una escala máxima: estrellas, galaxias, cúmulos (o clusters) de galaxias, y aún más allá, hasta la inmensa expansión del propio universo. El otro pilar es la mecánica cuántica, que ofrece un marco teórico para la comprensión del universo a escalas mínimas: moléculas, átomos, y así hasta las partículas subatómicas, como los electrones y los quarks. A lo largo de años de investigación, los físicos han confirmado experimentalmente, con una exactitud casi inimaginable, la práctica totalidad de las predicciones que hace cada una de estas teorías. Sin embargo, estos mismos instrumentos teóricos conducen a otra conclusión inquietante: tal como se formulan actualmente, la relatividad general y la mecánica cuántica no pueden ser ambas ciertas a la vez. Las dos teorías en las que se basan los enormes avances realizados por la física durante los últimos cien años —unos avances que han explicado la expansión de los cielos y la estructura fundamental de la materia— *son mutuamente incompatibles".*

Si usted nunca ha oído previamente hablar de este feroz antagonismo, puede estar preguntándose por qué se produce. No es difícil encontrar la respuesta. Salvo en algunos casos muy especiales, los físicos estudian cosas que son o bien pequeñas y ligeras (como los átomos y sus partes constituyentes), o cosas que son enormes y pesadas (como las estrellas y las galaxias), pero no ambas a la vez. Esto significa que sólo necesitan utilizar la mecánica cuántica, o sólo la relatividad general, y pueden minimizar, con una

mirada furtiva, la vociferante advertencia que les lanza la teoría que no están utilizando. Durante cincuenta años este planteamiento no ha sido tan feliz como la ignorancia, pero ha estado muy cerca de serlo. No obstante, el universo puede ser un caso extremo. En las profundidades centrales de un agujero negro se aplasta una enorme masa hasta reducirse a un tamaño minúsculo. En el momento del big bang, la totalidad del universo salió en erupción de una pepita microscópica cuyo tamaño *hace que un grano de arena parezca gigantesco*. Estos contextos son diminutos y, sin embargo, tienen una masa increíblemente grande, por lo que necesitan basarse tanto en la mecánica cuántica como en la relatividad general. Aunque se desee mantener el profundo interior de un agujero negro y el surgimiento inicial del universo envueltos en el misterio, no se puede evitar sentir que la hostilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general está clamando por un nivel más profundo de comprensión. ¿Puede ser realmente que el universo en su nivel más importante esté dividido, requiriendo un conjunto de leyes cuando las cosas son grandes, y otro conjunto diferente e incompatible cuando son pequeñas?

*La teoría de las supercuerdas*, una advenediza en comparación con los venerables edificios de la mecánica cuántica y la relatividad general, responde con un rotundo no. Una intensa investigación llevada a cabo durante la última década por físicos y matemáticos de todo el mundo ha revelado que este nuevo planteamiento, encaminado a explicar la materia en su nivel más básico, resuelve la tensión existente entre la relatividad general y la mecánica cuántica. De hecho, la teoría de las supercuerdas muestra aún más: dentro de este nuevo marco, la relatividad general y la mecánica cuántica se necesitan la una a la otra para que esta teoría tenga sentido. Según

la teoría de las supercuerdas, el matrimonio entre las leyes de lo grande y las de lo pequeño no sólo es feliz, sino inevitable. Durante tres décadas, Einstein estuvo buscando una teoría unificada de la física, una teoría que entretejiera todas las fuerzas y todos los constituyentes materiales de la naturaleza dentro de un único tapiz teórico. Einstein no lo consiguió. Ahora, iniciado el nuevo milenio, los partidarios de la teoría de cuerdas anuncian que finalmente han salido a la luz los hilos de este escurridizo tapiz unificado. La teoría de cuerdas posee el potencial de mostrar que todos los sorprendentes sucesos que se producen en el universo —desde la frenética danza de esas partículas subatómicas llamadas quarks, hasta el majestuoso vals de las estrellas binarias en sus órbitas; desde la bola de fuego inicial del *big bang*, hasta los elegantes remolinos de las galaxias celestes— son reflejos de un gran principio físico, *de una ecuación magistral*.

Dado que estas características de la teoría de cuerdas exigen que cambiemos drásticamente nuestra manera de entender el espacio, el tiempo y la materia, llevará cierto tiempo que nos adaptemos a ella hasta instalarnos en un nivel en el que resulte cómodo manejarla. El primero de estos conflictos, que ya se había detectado nada menos que a finales del siglo XIX, se refiere a las desconcertantes propiedades del movimiento de la luz. Dicho resumidamente, según las leyes del movimiento de Isaac Newton, si alguien pudiera correr a una velocidad suficientemente rápida podría emparejarse con un rayo de luz que se esté emitiendo, mientras que, según las leyes del electromagnetismo de James Clerk Maxwell, esto es imposible. Einstein resolvió este conflicto mediante su teoría de la relatividad especial y así le dio un vuelco completo a nuestro modo de entender el espacio y el tiempo. Según la relatividad especial, ya

no se puede considerar al espacio y al tiempo como conceptos universales grabados en piedra y percibidos de forma idéntica por todos los individuos. El espacio y el tiempo surgieron, a partir de la reelaboración llevada a cabo por Einstein, como estructuras maleables cuya forma y modo de presentarse dependen del estado *de movimiento del observador*. El desarrollo de la relatividad especial creó inmediatamente el escenario para el segundo conflicto. Una de las conclusiones del trabajo de Einstein es que ningún objeto —de hecho, ninguna influencia o perturbación de ninguna clase— puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz. Sin embargo, la teoría universal de la gravedad de Newton, que experimentalmente funciona tan bien y es tan grata para la intuición, habla de influencias que se transmiten en el espacio a grandes distancias *instantáneamente*.

De nuevo fue Einstein quien intervino en el conflicto y lo resolvió ofreciendo un nuevo concepto de la gravedad en su teoría general de la relatividad de 1915. Del mismo modo que la relatividad especial trastocó los conceptos previos de espacio y tiempo, lo hizo la relatividad general. No es sólo que el espacio y el tiempo estén influidos por el estado de movimiento del observador, sino que, además, *pueden alabearse y curvarse* en respuesta a la presencia de materia o energía. Tales distorsiones en la estructura del espacio y el tiempo, como veremos más adelante, transmiten la fuerza de la gravedad de un lugar a otro. Por consiguiente, no se puede ya pensar que el espacio y el tiempo sean un telón de fondo inerte en el que se desarrollan los sucesos del universo; al contrario, según la relatividad especial y la relatividad general, son actores que desempeñan un papel íntimamente ligado al desarrollo de dichos sucesos. A lo largo de tres décadas a partir de 1900, los físicos desarrollaron la mecánica

cuántica en respuesta a varios problemas evidentes que se pusieron de manifiesto cuando los conceptos de la física del siglo XIX se aplicaron al mundo microscópico. Dado que hasta mediados de la década de 1980 no se presenta la solución que ofrecía la teoría de cuerdas, a dicho conflicto se le llama con toda razón el problema central de la física moderna. Además, la teoría de cuerdas, que se construye sobre la relatividad general y la relatividad especial, exige también una seria renovación de nuestros conceptos de espacio y tiempo. Por ejemplo, la mayoría de nosotros considera evidente que nuestro universo tenga tres dimensiones espaciales. Sin embargo, según la teoría de cuerdas esto no es así, ya que dicha teoría afirma que nuestro universo posee muchas más dimensiones que las que se perciben a simple vista —dimensiones que están arrolladas apretadamente dentro de la estructura plegada del cosmos—.En realidad, la teoría de cuerdas es la historia del espacio y el tiempo desde Einstein.

Durante el último siglo hemos aprendido sobre la estructura microscópica del universo, lo que sabemos sobre la materia. Los antiguos griegos suponían que la materia del universo estaba formada por diminutos componentes «indivisibles» que ellos llamaban átomos. Del mismo modo que el número de palabras posibles en un lenguaje alfabético está formado por el gran número de combinaciones de una pequeña cantidad de letras, los griegos intuyeron que la amplia variedad de objetos materiales podría también resultar de combinaciones hechas mediante un pequeño número de bloques elementales distintos. Fue una intuición presciente. Más de dos mil años después seguimos creyendo que esto es cierto, aunque la identidad de las unidades más fundamentales ha sido sometida a numerosas revisiones. En el

siglo XIX, los científicos demostraron que muchas sustancias corrientes, como el oxígeno y el carbono, tenían un componente mínimo reconocible; siguiendo la tradición establecida por los griegos, lo llamaron átomo. El nombre permaneció, aunque la historia ha demostrado que era un nombre inapropiado, ya que los átomos son ciertamente «divisibles». A principios de la década de 1930, las obras colectivas de J. J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr y James Chadwick habían establecido la estructura del sistema solar como un modelo atómico que nos resulta conocido a la mayoría de nosotros.

## 3.2. Materia invisible y universos ocultos

Lisa Randall es una física teórica estadounidense, especializada en la física de partículas y cosmología. Ha trabajado en varios de los modelos de teoría de cuerdas que tratan de explicar el funcionamiento íntimo del universo. Su contribución más conocida en este campo es el modelo de Randall-Sundrum o modelo RS publicado en 1999 junto con Raman Sundrum. Fue la primera mujer en ocupar un puesto en el departamento de física de la Universidad de Princeton y la primera mujer Física Teórica en el MIT y en la Universidad de Harvard. ¿Por qué pensar en dimensiones nunca vistas? Lisa Randall se hace estas preguntas en su libro, *Universos ocultos. Una exploración clara de dimensiones adicionales y materia invisible,* no solo por las dimensiones que no conocemos más allá del "largo, ancho y alto" habitual en nuestra vida diaria, sino en la materia

invisible y los universos ocultos. Aunque la física con dimensiones extras permita concebir estos panoramas intrigantes, podría seguir asombrándonos que los físicos, cuya misión es hacer predicciones sobre los fenómenos observables, se preocupen de tomárselos en serio. La respuesta es tan radical como la idea misma de dimensión extra. Algunos avances recientes sugieren que las dimensiones extras, no detectadas y no comprendidas del todo aún, podrían sin embargo resolver algunos de los misterios más básicos de nuestro universo. Las dimensiones extras podrían tener implicaciones en el mundo que vemos, y las ideas sobre ellas podrían revelar en última instancia conexiones que no percibimos en el espacio tridimensional. No podríamos comprender por qué los esquimales y los chinos comparten rasgos físicos si dejáramos de tener en cuenta la dimensión temporal que nos permite reconocer sus antepasados comunes. De igual modo, las conexiones que pueden darse con dimensiones adicionales del espacio podrían iluminar aspectos desconcertantes de la física de partículas, arrojando luz sobre misterios que llevan décadas sin resolverse. Relaciones entre las propiedades y las fuerzas de las partículas que parecían inexplicables cuando el espacio estaba encadenado a tres dimensiones parecen encajar de un modo elegante en un mundo con más dimensiones espaciales.

Lisa Randall[4] nos hace una exploración clara de dimensiones adicionales y materia invisible. “A continuación he descrito algunas nociones más recientes y especulativas, estudiadas en los últimos treinta años sobre la supersimetría y la teoría de cuerdas. Tradicionalmente, la física ha requerido una interacción entre teoría

[4]*Universos ocultos. Una exploración clara de dimensiones adicionales y materia invisible.* Lisa Randall –

y experimento. La supersimetría es una extensión de los conceptos conocidos de la física de partículas y son muchas las probabilidades de que se la verifique en próximos experimentos. El caso de la teoría de cuerdas es diferente. Se basa únicamente en ideas y cuestiones teóricas y ni siquiera ha sido formulada matemáticamente por entero, así que todavía no podemos estar seguros de sus predicciones. En lo que a mí respecta, soy agnóstica en este asunto: no sé cómo quedará la teoría de cuerdas en última instancia, ni si resolverá las cuestiones de mecánica cuántica que pretende abordar. Pero la teoría de cuerdas ha sido una rica fuente de ideas nuevas, algunas de las cuales yo misma he explorado en mis investigaciones sobre las dimensiones extras del espacio. Estas ideas existen independientemente de la teoría de cuerdas, pero la teoría de cuerdas nos da una buena razón para pensar que algunas de sus suposiciones subyacentes podrían ser ciertas.

El contexto de las dimensiones extras nos dice cosas notables, como que las dimensiones extras pueden ser de tamaño infinito y, sin embargo, permanecer invisibles, o que quizá vivamos en un sima tridimensional dentro de un universo de dimensión superior. Asimismo, hay razones para pensar que pueden existir mundos paralelos nunca vistos, con propiedades muy diferentes de las que posee el nuestro. La pregunta sería ¿estamos dentro o fuera de las dimensiones extra? La física ha entrado en una era realmente notable. Descubrimientos teóricos completamente nuevos sobre las dimensiones extras han cambiado irreversiblemente el modo en que los físicos de partículas, los astrofísicos y los cosmólogos piensan ahora sobre el mundo. El número total y el ritmo de los descubrimientos nos dicen que solamente hemos arañado la superficie de las maravillosas posibilidades que nos están

esperando. Las ideas han cobrado vida propia. “No obstante,-nos dice Randall- hay muchas cuestiones que esperan una respuesta completa y aún falta mucho para que nuestro viaje termine. Los físicos de partículas todavía quieren saber por qué vemos las fuerzas concretas que vemos y si hay o no alguna más. ¿Cuál es el origen de las masas y de las propiedades de las partículas familiares? Queremos saber también si la teoría de cuerdas es correcta o incorrecta. Y, si es correcta, ¿cómo se conecta con nuestro mundo? Observaciones recientes del cosmos apuntan hacia otros misterios que queremos abordar. ¿Qué es lo que compone la mayor parte de la energía y de la materia del universo? ¿Hubo una breve fase de expansión explosiva al principio de la evolución del universo? Y si fue así, ¿qué fue lo que la causó? Asimismo, todo el mundo quiere saber cómo era el universo cuando nació.

Ahora sabemos que la gravedad puede comportarse de modo diferente en diferentes escalas de distancia. A distancias muy cortas, sólo una teoría cuántica de la gravedad, como la teoría de cuerdas, podrá describir la gravedad. En escalas más grandes, la relatividad general funciona muy bien, pero algunas observaciones recientes a lo largo del universo a distancias enormes plantean enigmas cosmológicos, como, por ejemplo, qué es lo que acelera su expansión. Y a distancias todavía más grandes, alcanzamos el horizonte cosmológico más allá del cual no sabemos nada.

Uno de los aspectos intrigantes de las teorías extradimensionales es que tienen, naturalmente, diferentes consecuencias a diferentes escalas. En dichas teorías, a distancias más pequeñas que las dimensiones enrolladas o donde la curvatura es demasiado pequeña para tener efecto, la gravedad exhibe un comportamiento diferente del que presenta a distancias más

grandes, donde las dimensiones podrían ser invisibles o donde el arqueo puede ser importante. Esto nos da una razón para creer que las dimensiones extras podrían, finalmente, arrojar luz sobre algunas de las propiedades misteriosas del universo. Si vivimos en un mundo multidimensional, no podremos, ciertamente, hacer caso omiso de sus consecuencias cosmológicas. Ya se han hecho algunas investigaciones en este dominio, pero estoy segura de que son muchos más los resultados interesantes que nos esperan. ¿Hacia dónde pienso que va a dirigirse la física a partir de ahora? Hay demasiadas posibilidades para poder enumerarlas todas. Pero permítaseme describir algunas observaciones intrigantes que sugieren que nos pueden estar esperando más sorpresas teóricas importantes, que acaso se acerquen a su solución en un breve plazo. Estos misterios se centran en una cuestión que, en este punto, podría parecer chocante, a saber: ¿Qué son las dimensiones, después de todo?

Lisa Randall se pregunta asombrada de sí misma ¿Cómo puedo plantear esta pregunta a estas alturas del partido? He dedicado gran parte de este libro a discutir el significado de las dimensiones y algunas de las implicaciones potenciales de los hipotéticos mundos extradimensionales. Pero ahora permítaseme volver brevemente sobre esta cuestión. ¿Qué significa, realmente, el número de dimensiones? Sabemos que el número de dimensiones se define como el número de cantidades que necesitamos para localizar un punto en el espacio. Pero también presenté que las teorías de dimensión diez tienen a veces las mismas consecuencias físicas que las teorías de dimensión once. Esta dualidad sugiere que nuestra noción de dimensión no es tan firme como parece: hay una plasticidad en la definición que elude la terminología convencional.

La formulación e incluso el número de dimensiones en la mejor descripción podría depender de la intensidad de los acoplamientos entre cuerdas, por ejemplo. Como no siempre hay una única teoría que sea la mejor descripción, la cuestión del número de dimensiones no siempre tiene una respuesta sencilla.

### 3.3. Descubriendo con estupor el mundo.

Carlo Rovelli es un físico teórico, escritor y divulgador italiano, reconocido como uno de los fundadores de la gravedad cuántica de bucles. Profesor en la Universidad de Aix-Marsella, ha aportado ideas como la mecánica cuántica relacional y la hipótesis del tiempo térmico. Autor de éxitos como *Siete breves lecciones de física* y *El orden del tiempo*, combina física y filosofía, defendiendo una visión interconectada de la realidad y acercando conceptos complejos al gran público. Carlo Rovelli[5] quiere indicarnos que la física cuántica y la gravedad cuántica son ventanas a lo invisible. El universo es

[5] *La realidad no es lo que parece*. Carlo Rovelli

multiforme e ilimitado y no paramos de descubrir nuevos aspectos de él. Cuanto más aprendemos del mundo, más nos admira su variedad, belleza y simplicidad. Pero cuantas más cosas descubrimos, más cuenta nos damos también de que lo que no sabemos es más grande que lo que hemos descubierto. Cuanto más potentes son nuestros telescopios, más cielos extraños e inesperados vemos. Cuanto más miramos los detalles diminutos de la materia, más estructuras profundas observamos. Hoy vemos casi hasta el *big bang*, la gran explosión que hace catorce mil millones de años dio origen a todas las galaxias del cielo, pero ya comenzamos a entrever que hay algo más allá del *big bang*. Hemos descubierto que el espacio se curva y ya empezamos a sospechar que ese mismo espacio está compuesto de granos cuánticos que vibran.

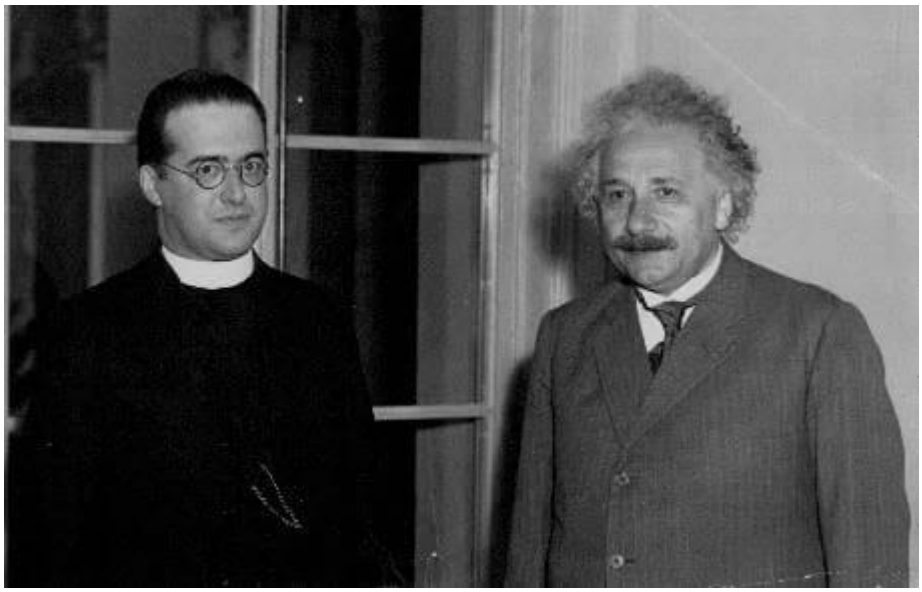
Nuestro conocimiento de la gramática elemental del mundo no cesa de aumentar. Si reunimos todo lo que hemos aprendido del mundo físico en el curso del siglo XX, vemos que apunta a algo que nada tiene que ver con las ideas que nos enseñaron en el colegio sobre la materia y la energía, sobre el espacio y el tiempo. Vemos una estructura elemental del mundo en la que no existe el tiempo ni el espacio, y que consiste en un pulular de fenómenos cuánticos. El espacio, el tiempo, la materia y la luz crean una serie de campos cuánticos que se intercambian información. La realidad es una red de fenómenos granulares; la dinámica que los une es probabilística. Entre un fenómeno y otro, el espacio, el tiempo, la materia y la energía se disuelven en una nube de probabilidades. Lo cierto es que digerir un mundo infinito nos haría dioses y la realidad la vamos conociendo paso a paso. Antes decíamos que podíamos conocer hasta el *big bang* pero porque grandes científicos han podido demostrar que el universo se expande y se curva. “En 1927 un joven

científico belga educado por los jesuitas,-nos describe Rovelli- que se había ordenado sacerdote católico unos años antes, estudia las ecuaciones de Einstein y se da cuenta, como poco antes se había percatado Einstein, de que pueden predecir la expansión o contracción del universo. Pero en vez de negar este resultado, como había hecho Einstein, y de empeñarse en borrarlo, el cura belga se lo toma en serio y pide que le envíen los primeros datos disponibles sobre la observación de las galaxias. Entonces no se llamaban «galaxias», se llamaban «nebulosas», porque vistas por el telescopio parecían nubecillas opalescentes que había entre las estrellas y aún no estaba claro que fueran lejanas e inmensas islas de estrellas como nuestra propia galaxia. Pero el joven belga comprende que los datos son compatibles con la idea de que, efectivamente, el universo está expandiéndose: las galaxias vecinas se alejan a gran velocidad, como si las hubieran lanzado. Las más lejanas se alejan aún más velozmente. Todo el universo está inflándose como un globo.

La intuición se confirmó dos años después gracias a dos astrónomos norteamericanos, Henrietta Leavitt y Edwin Hubble. La primera inventó una técnica para medir la distancia de las nebulosas que permitió confirmar que se hallan lejos, fuera de nuestra galaxia. El segundo, usando la misma técnica y el gran telescopio del

observatorio de Monte Palomar, obtuvo datos precisos que corroboraron el hecho de que las galaxias se alejan.

Pero fue el joven belga quien dedujo, ya en 1927, la consecuencia crucial: si vemos una piedra que sube, es que antes estaba más abajo y algo la ha lanzado hacia arriba. Si vemos que las galaxias se alejan y el universo se expande, es que antes las galaxias estaban cerca y el universo era pequeño, y algo ha provocado su expansión. El joven belga sugiere que, al principio, el universo era muy pequeño y comprimido y empezó a expandirse a consecuencia de algo como una enorme explosión. A ese estado inicial lo llama



«átomo primordial». Hoy lo llamamos «big bang». Se llama Georges Lemaître. En francés, «Lemaître» suena como «el Maestro»: pocos nombres hay tan apropiados. Pero, pese a ello, Lemaître tenía un carácter esquivo y reservado, rehuía las polémicas y nunca hizo nada para evitar que el mérito del descubrimiento de la expansión del universo se atribuyera a Hubble más que a él. Sin embargo, su pensamiento sobresalía y hoy vivimos a la sombra de dicho pensamiento. Dos episodios de su vida ilustran su profunda

inteligencia. El primero tiene que ver con Einstein; el segundo, con el Papa. Rovelli lo explica muy bien: “Einstein —como he dicho— era al principio muy escéptico respecto de la expansión del universo. Se había educado creyendo que el universo estaba inmóvil y no supo ver enseguida que no era así. También los grandes hombres se equivocan y son víctimas de sus ideas preconcebidas. Lemaître se encontró con Einstein y trató de disuadirlo de sus prejuicios. Einstein se resistió al principio. Llegó a decirle: «Cálculos correctos, física abominable». Luego tuvo que reconocer que Lemaître tenía razón. No todos podemos desmentir a Einstein.

La cosa se repitió: Einstein había introducido la «constante cosmológica», pequeña pero importante modificación de sus ecuaciones, con la esperanza (infundada) de hacer estas ecuaciones compatibles con un universo estático. Cuando admitió que el universo no era estático, quiso deshacerse de la constante cosmológica. Lemaître, de nuevo, intentó disuadirlo: la constante cosmológica no hace al universo estático, pero sigue siendo válida y no hay razón para suprimirla. También en este caso llevaba razón Lemaître: la constante cosmológica produce una aceleración de la expansión del universo que ha podido medirse recientemente. Una vez más, Einstein se equivocaba y Lemaître estaba en lo cierto.

Cuando la idea de que el universo tuvo su origen en un big bang empezó a difundirse, el papa Pío XII declaró en un discurso público (el 22 de noviembre de 1951) que la teoría del big bang confirmaba el relato del Génesis. Esta toma de posición del Papa preocupó mucho a Lemaître, que se puso en contacto con el consejero científico vaticano y por su conducto pudo convencer al Santo Padre para que no volviera a hablar en público de la relación entre la creación divina y el big bang. Lemaître creía que mezclar así ciencia

y religión era absurdo: la Biblia no sabe de física y la física no sabe de Dios. Pío XII se avino a razones y no volvió a referirse al tema en público. No todos podemos desmentir al Papa. Y, por supuesto, también en este caso tenía razón Lemaître: hoy se habla mucho de la posibilidad de que el big bang no sea el verdadero principio y de que antes hubiera otro universo. Imaginémonos en qué apuro se hallaría hoy la Iglesia católica si Lemaître no hubiera callado al Papa y la doctrina oficial fuera que el big bang es la creación. ¡En lugar de Fiat lux habría que decir Vuelva a hacerse la luz!”

# 4. MUNDOS INVISIBLES DE LA BIOLOGÍA

Lynn Margulis, nombre de nacimiento Lynn Petra Alexander (1938-2011), fue una destacada bióloga estadounidense, considerada una de las principales figuras en el campo de la evolución biológica. Durante las últimas décadas se ha producido una revolución en las ciencias de la vida. Las pruebas fósiles de la existencia de vida microbiana primitiva, la decodificación del DNA y los descubrimientos en relación a la composición de nuestras propias células han hecho saltar por los aires las ideas establecidas sobre el origen de la vida y la evolución en la Tierra. Ante todo, nos han mostrado la insensatez de considerar el ser humano como especial, totalmente distinto y supremo. El microscopio ha ido mostrando

gradualmente la inmensidad del microcosmos y ahora nos proporciona una visión sobrecogedora de nuestro verdadero lugar en la naturaleza. Ahora parece ser que los microbios (llámeseles microorganismos, gérmenes, protozoos o bacterias, según el contexto), además de ser los cimientos de la vida en la Tierra, ocupan un lugar indispensable en toda estructura viva y son necesarios para su supervivencia. Desde el paramecio (organismo microscópico formado por una sola célula) hasta el género humano, todas las formas de vida son complicados agregados meticulosamente organizados de vida microbiana en evolución. Los microorganismos, lejos de haberse detenido en un peldaño inferior de la escala evolutiva, forman parte de nuestro entorno y de nuestro propio organismo. Tras haber sobrevivido a lo largo de una línea ininterrumpida desde los comienzos de la vida, todos los organismos han alcanzado en la actualidad un mismo nivel de evolución. La visión de la evolución como una lucha crónica y encarnizada entre individuos y especies, distorsión popular de la idea darwiniana de la «supervivencia de los mejor dotados», *se desvanece* con la nueva imagen de cooperación continua, estrecha interacción y mutua dependencia entre formas de vida. La vida no ocupó la Tierra tras un combate, sino extendiendo una red de colaboración por su superficie. Las formas de vida se multiplicaron y se hicieron cada vez más complejas, integrándose con otras, en vez de hacerlas desaparecer.

Al no poder observar a simple vista el microcosmos tendemos a menospreciar su importancia. Sin embargo, de los tres mil millones y medio de años que la vida lleva existiendo sobre la Tierra, la completa historia de la humanidad, desde la vida de las cavernas hasta el moderno apartamento de nuestros días, representa bastante menos del uno por ciento de todo este tiempo. La vida en la Tierra no

sólo se originó en un primer momento de su historia como planeta, sino que durante los primeros dos mil millones de años sus únicos habitantes fueron exclusivamente microorganismos bacterianos. En realidad, tan importantes son las bacterias, y tan importante es su evolución, que la división fundamental de los seres vivos en la Tierra no es la tradicionalmente supuesta entre plantas y animales, sino entre procariontes (organismos constituidos por células sin núcleo, es decir, las bacterias) y eucariontes (todas las demás formas de vida). En sus primeros dos mil millones de años los procariontes transformaron continuamente la superficie de la Tierra y la atmósfera. Fueron los inventores, a escala reducida, de todos los sistemas químicos esenciales para la vida, cosa que el ser humano está aún lejos de conseguir. Esta antigua y elevada biotecnología condujo al desarrollo de la fermentación, de la fotosíntesis, de la utilización del oxígeno en la respiración y de la fijación del nitrógeno atmosférico. También fue la causa de diversas crisis de hambre, contaminación y extinción a escala planetaria mucho antes de que se vislumbraran formas de vida de mayor tamaño.

Lynn Margulis[6] tiene obras maestras como "*Microcosmos"* que son obras maestras sobre el mundo microbiano y su papel en la evolución. Hasta mediados de este siglo se creía que la vida había empezado hacía algo más de 570 millones de años, ya que en las rocas de esa edad de todas partes de la Tierra se habían encontrado fósiles de animales con cubierta dura en abundancia extraordinaria, tanta que, a menudo, se habla de este fenómeno como de la explosión cámbrica. Hasta entonces nunca se habían encontrado fósiles de animales con esqueleto en rocas más antiguas. Algunos

[6] *Microcosmos.* Lynn Margulis; *Captando genomas*. Lynn Margulis; *Planeta simbiótico*. Lynn Margulis

científicos, sin tener en cuenta que animales más sencillos y de cuerpos más blandos podían no haberse conservado, dedujeron que no sólo los animales habían aparecido de manera repentina, sino también la vida misma. Resultó que las rocas de Inglaterra y Gales, que albergan algunos de los depósitos de fósiles de organismos primigenios mejor estudiados, carecían de los últimos estratos precámbricos. Cuando se hallaron formaciones de rocas más continuas en China, el sur de Australia, Siberia y en muchas otras zonas, se observaron en ellas abundantes impresiones en arenisca de animales marinos de cuerpo blando, fáciles de identificar, que se conservaban en excelentes condiciones. Más recientemente, el Precámbrico ha sido minuciosamente revisado por Barghoorn y otros científicos para descubrir sus fósiles, que eran difíciles de percibir, lo que ha proporcionado una buena prueba de que el probable origen de la vida es más antiguo de lo que se había creído.

Uno de los cambios más destacados que ha experimentado nuestra visión de la Tierra en las últimas décadas ha sido el reconocimiento de la importancia que tiene la vida en la geoquímica de nuestro planeta, especialmente las formas de vida que escapan al poder de resolución del ojo humano. La Tierra ha funcionado como un sistema vivo mucho antes de que nuestra especie apareciese. Comunidades de microorganismos muy distintos colaboran en el mantenimiento de los sedimentos de la superficie y de la atmósfera del planeta; lo están haciendo desde hace más de 3500 millones de años. Y lo seguirían haciendo, aunque nuestra especie llegase a desaparecer algún día. No hay ningún bosque, desierto, lago o cualquier otro sistema ecológico de cualquier tamaño que no se encuentre infiltrado, cubierto o penetrado por un tipo u otro de sistema microbiano. El estudio de las comunidades microbianas que

cubren los suelos, especialmente en algunas zonas costeras y lagunas hipersalinas, nos proporciona algunas claves para saber cómo han podido mantenerse dinámicamente estables los ecosistemas bacterianos. Es probable que esos tapetes microbianos hayan cubierto todas las costas y los continentes emergidos durante más de 3000 millones de años y que hayan actuado como una fuerza geológica, dejando su huella en el paisaje. Muchas veces, sin embargo, se ignora la existencia de estas comunidades. Algunas zonas intermareales, costas sin vegetación y cubiertas por tapetes microbianos, son consideradas a menudo totalmente improductivas. La vida que albergan pasa inadvertida. A simple vista, un corte del sedimento muestra unas franjas de distintos colores que se extienden por unos pocos milímetros. La observación al microscopio electrónico de esos sedimentos, que parecen barro sucio, nos muestra una gran variabilidad biológica y una gran cantidad de microorganismos; se cuentan por cientos de millones en un solo centímetro cúbico.

Al tiempo que avanzábamos en el conocimiento del microcosmos que nos rodea y en el cual estamos inmersos, el desarrollo de la tecnología espacial nos permitía adquirir una imagen física exacta de nuestra posición en el universo, donde no somos más que un pequeño planeta, el tercero alrededor de una entre los millones de estrellas de nuestra galaxia. En palabras de Claude Nicolier, el único astronauta suizo, después de su vuelo en la lanzadera Atlantis, en 1992: «La Tierra no es más que un astro en medio de los otros; a corta distancia, naturalmente, parece muy grande, pero lo importante es que es “nuestro” planeta. Y aunque de día no puede apreciarse la presencia de vida, de noche se detectan las grandes ciudades. Hay luz, se detecta la presencia humana». En 1969, James E. Lovelock formuló la *hipótesis de Gaia*. En sus

palabras, «las condiciones físicas y químicas de la superficie de la Tierra, de la atmósfera y de los océanos se han hecho adecuadas para la vida debido a las actividades de los propios organismos. Esto contrasta con la visión anterior, que mantenía que la vida se había adaptado a las condiciones existentes en la Tierra, y que ésta y la vida habían evolucionado separadamente».

De acuerdo con el concepto de Gaia, la biosfera, la atmósfera, los océanos y el suelo constituyen un sistema de retroalimentación o cibernético que encuentra en cada momento el ambiente físico-químico más adecuado para la vida. En cualquier tiempo dado, este sistema es relativamente constante, tanto en las características ambientales como en las formas y fisiología de los organismos. Lovelock se refirió primero a esta situación de equilibrio como «homeostasis» (un término propuesto por el fisiólogo de la Universidad de Harvard, Walter B. Cannon), para señalar el notable grado de constancia en el que se mantienen los seres vivos a pesar de los cambios de su ambiente. Pero ese equilibrio es dinámico. Los seres vivos cambian y aparecen nuevos ecosistemas. La evolución conjunta de la Tierra y de la vida es una «homeorresis», es decir, una sucesión de equilibrios que permiten la evolución de nuevas formas de vida y los cambios en la superficie de la Tierra.

## 4.1. El universo invisible de los microbios que nos habitan

Edmund Soon-Weng Yong (1981) es un británico-estadounidense periodista científico y autor. En 2021 recibió un Premio Pulitzer de Reportajes Explicativos para una serie sobre el Pandemia de COVID-19. Es especialista en el universo invisible de los microbios[7]. En su obra que citamos la subtitula "*Los microbios que nos habitan y una visión más amplia de la vida*". Lo que nos dice Yong es que todos nosotros sembramos constantemente el mundo con nuestros microbios. Cada vez que tocamos un objeto, dejamos una huella microbiana sobre él. Cada vez que caminamos, hablamos, nos

[7] *Yo contengo multitudes*. Ed Yong

rascamos, arrastramos los pies o estornudamos, emitimos una nube personalizada de microbios a nuestro alrededor. Cada persona aerosoliza alrededor de 37 millones de bacterias por hora. Esto significa que nuestro microbioma no está confinado en nuestro cuerpo. De forma constante alcanza nuestro entorno. Cuando iba sentado en el coche de Gilbert antes de llegar a su casa, dejé microbios por todo el asiento. Ahora que estoy reclinado contra la encimera de la cocina, dejo en ella la firma de mis bacterias personales. Albergo multitudes, sí, pero solo algunas siguen conmigo; el resto lo extiendo por el mundo en una suerte de aura viviente. Cuando caminaba por el zoológico de San Diego me sorprendió lo diferente que me parecía todo con los microbios en la mente. Cada visitante, cada cuidador y cada animal me parecía un mundo con piernas, un ecosistema móvil que interactuaba con otros, en gran parte ignorante de sus multitudes internas.

Cuando conduzco por Chicago, experimento el mismo cambio vertiginoso de perspectiva. Veo el vientre microbiano de la ciudad, el rico manto de vida que lo cubre y que ráfagas de viento, corrientes de agua y sacos móviles de carne desplaza. Veo amigos que se dan la mano y preguntan: «¿Qué tal estás?», y el intercambio de organismos vivos que en ese momento se produce. Veo personas caminando por la calle que dejan nubes de sí mismas a modo de estelas. Veo las decisiones con las que hemos moldeado sin darnos cuenta el mundo microbiano a nuestro alrededor: la opción de construir con hormigón en vez de ladrillo, la apertura de una ventana y la hora a que un portero friega los suelos cada día. Y veo en el asiento del conductor a un tipo que sabe de esos ríos de vida microscópica y que además lo cautivan en vez de repelerlo. Él sabe que la mayoría de los microbios no tienen por qué infundir temor ni

ser destruidos, sino estimados, admirados y estudiados. Este es el punto de vista desde el cual he contado todas las historias de este libro. Ha sido un largo proyecto de décadas para averiguar cómo la leche nutre las bacterias de un bebé; desde las intrépidas expediciones a profundos respiraderos oceánicos hasta los intentos, más sosegados, de descubrir los secretos simbióticos de los humildes áfidos[8].

El libro de Yong explora el increíble universo que existe en el interior de nuestros cuerpos. Aprenderemos mucho sobre los orígenes de nuestras alianzas con los microbios, sobre las formas, en apariencia contrarias al sentido común, en que ellos esculpen nuestros cuerpos y modelan nuestra vida cotidiana, y sobre los trucos que utilizamos para conservarlos y asegurarnos una asociación cordial. Veremos que sin darnos cuenta interrumpimos esta asociación y ponemos en peligro nuestra salud. Descubriremos cómo podemos evitar estos problemas manipulando el microbioma en nuestro beneficio. Y escucharemos historias de científicos desenvueltos, imaginativos y motivados que han dedicado su vida a entender el mundo microbiano, a menudo haciendo frente al desprecio, el rechazo y el fracaso. Las hormigas cortadoras de hojas también albergan en sus cuerpos microbios productores de antibióticos que usan para desinfectar los hongos que cultivan en sus jardines subterráneos. El pez globo, un animal dotado de púas que se infla, utiliza bacterias para producir tetrodotoxina, una sustancia excepcionalmente letal que envenena a cualquier depredador que intente comérselo.

[8] Los áfidos, conocidos comúnmente como *pulgones*, son pequeños insectos parásitos que se alimentan de la savia de las plantas. Miden pocos milímetros, tienen cuerpos blandos en forma de pera y pueden ser verdes, negros, amarillos o rojos. Representan una de las plagas más comunes y destructivas en la agricultura y la jardinería. Todos los días los veo en mi huerto.

Las bacterias están en todas partes, pero para nuestros ojos no están en ninguna parte. Hay algunas excepciones extraordinarias: el Epulopiscium fishelsoni, una bacteria que vive tan solo en las vísceras del pez cirujano regal azul, es aproximadamente del tamaño de este punto tipográfico. (.) Sin embargo, el resto no puede apreciarse sin ayuda, lo que significa que durante mucho tiempo no se las ha visto en absoluto. En nuestro calendario imaginario, que condensa la historia de la Tierra en un año, las bacterias aparecieron por primera vez a mediados de marzo. Prácticamente ningún ser era consciente de su existencia en todo su reinado. Su existencia incógnita solo se reveló unos segundos antes de fin de año, cuando un holandés curioso tuvo la caprichosa idea de examinar una gota de agua a través de unas lentes de una calidad excepcional que él mismo había fabricado. Antony van Leeuwenhoek nació en 1632 en la ciudad de Delft, un bullicioso centro de comercio exterior atravesado por canales, árboles y rúas empedradas. Durante el día trabajaba como funcionario municipal y regentaba una pequeña mercería. Durante la noche fabricaba lentes. Era un buen momento y lugar para hacerlo: los holandeses acababan de inventar el microscopio compuesto y el telescopio. Los científicos observaban a través de pequeños círculos de cristal los objetos que estaban demasiado lejanos o que eran demasiado pequeños para ser vistos por los ojos directamente. El polímata británico Robert Hooke era uno de ellos. Observaba toda clase de cosas diminutas: las pulgas, los piojos aferrados a los pelos, las puntas de las agujas, las plumas del pavo real, las semillas de amapola. En 1665 publicó sus observaciones en un libro titulado *Micrografía*, lleno de magníficas y muy detalladas ilustraciones. Fue un *best seller* en Gran Bretaña.

Leeuwenhoek se distinguía de Hooke en que nunca fue a la universidad, no recibió ninguna formación científica y hablaba solo holandés, es decir, nada del erudito latín. Aun así, aprendió por su cuenta a fabricar lentes, y lo hizo con una destreza inigualable. Se desconocen los detalles exactos de su técnica, pero, hablando en términos generales, desbastaría y luego puliría una pequeña masa de vidrio hasta obtener una lente lisa y perfectamente simétrica de menos de dos milímetros de diámetro. Después la colocaría entre dos rectángulos de latón. Luego fijaría una muestra delante de la lente en un minúsculo alfiler y ajustaría su posición con un par de tornillos. El microscopio resultante parecía una bisagra embellecida, y era poco más que una lupa ajustable. Para usarlo, Leeuwenhoek tenía que mantenerlo tan cerca que casi tocaba su rostro mientras miraba a través de su minúscula lente, preferiblemente bajo la luz del sol. Estos modelos de lente única obligaban a forzar mucho más la vista que los microscopios compuestos multilente que defendía Hooke. Con todo, producían imágenes más claras y con más aumentos. Los instrumentos de Hooke aumentaban los objetos entre 20 y 50 veces; Leeuwenhoek los aumentaba hasta 270 veces. En aquella época eran los mejores microscopios del mundo.

Pero Leeuwenhoek era «más que un buen fabricante de microscopios —observa Alma Smith Payne en *The Cleere Observer*—. También era un excelente microscopista, un usuario de microscopios». Todo lo documentaba. Repetía las observaciones. Realizaba metódicos experimentos. Aunque era un aficionado, utilizaba de forma instintiva el método científico, que había arraigado en él junto con la curiosidad ilimitada del científico por el mundo que le rodea. A través de sus lentes examinó pelos de animales, cabezas de moscas, madera, semillas, músculos de ballena, escamas de la

piel y ojos de buey. Vio maravillas, que mostraba a amigos, familiares y hombres doctos de Delft. Uno de estos sabios, el médico Regnier de Graaf, miembro de la Royal Society, un estimado gremio científico recién fundado con sede en Londres, recomendó a Leeuwenhoek —cuyos microscopios, decía, «superan con mucho los que hemos visto hasta ahora»— a sus colegas, suplicándoles que contactasen con él. Henry Oldenburg, secretario de la institución y editor de su revista, así lo hizo, y finalmente tradujo y publicó varias de las conmovedoras, informales y laberínticas cartas del extranjero Leeuwenhoek que describían los glóbulos rojos, los tejidos de las plantas y las tripas de piojo con un detalle y una exactitud incomparables.

Más tarde, el holandés examinó el agua, concretamente el agua del lago Berkelse cercano a Delft. Succionó las turbias aguas con una pipeta de vidrio, dispuso las muestras en su microscopio y vio que estaban repletas de vida: «pequeñas nubes verdes» de algas junto a miles de diminutas criaturas danzantes. Los movimientos de la mayoría de estos «animáculos»(animal muy pequeño) en el agua eran tan rápidos y tan variados (hacia arriba, hacia abajo y en círculos) que era «maravilla observarlos —escribió—, y yo juzgaba que algunas de estas pequeñas criaturas eran más de mil veces más minúsculas que las más pequeñas que haya visto en la corteza del queso». Eran protozoos, el variado grupo de organismos que incluye las amebas y otros eucariotas unicelulares. Leeuwenhoek fue la primera persona que los vio.

En 1675, utilizó sus lentes para examinar agua de lluvia, que había recogido en un frasco azul situado fuera de su casa. Una vez más, un delicioso zoo se desplegó ante sus ojos. Vio formas serpenteantes que se enroscaban y desenroscaban, y óvalos «provistos de varios pies diminutos» (más protozoos). También observó ejemplos de una

clase de criaturas aún más diminutas, mil veces más pequeñas que el ojo de un piojo, que «giran con la rapidez de un trompo» (¡bacterias!). Examinó más muestras de agua: de su gabinete, de su tejado, de los canales de Delft, del cercano mar y del pozo de su jardín. Los pequeños «animáculos» estaban en todas partes. Al parecer, la vida existía en indecible abundancia allende el umbral de nuestra percepción, y solo aquel hombre era capaz de verla con sus excepcionales lentes. Como más tarde escribiría el historiador Douglas Anderson: «Casi todas las cosas que logró ver, él era el primer ser humano en verlas». Y algo notable: ¿por qué examinó ante todo el agua? ¿Qué era lo que movió a ese hombre a escudriñar el agua de lluvia que había recogido en un frasco? Una pregunta similar podríamos hacernos acerca de muchos investigadores a lo largo de la historia de la investigación del microbioma: ellos fueron los que aprendieron a mirar.

En octubre de 1676, Leeuwenhoek comunicó a la Royal Society lo que había visto. Todas sus misivas eran completamente ajenas al pesado discurso científico de las revistas académicas. Estaban llenas de chismes locales e informes acerca de su propia salud. («Aquel hombre necesitaba un blog», observa Anderson.) La carta de octubre, por ejemplo, nos habla del tiempo que hizo en Delft aquel verano. Pero también contiene descripciones detalladas y fascinantes de sus animáculos. Estos eran «increíblemente pequeños; no, eran tan pequeños a mi vista que juzgué que, si cien de estos minúsculos animales se colocasen uno junto a otro, no alcanzarían el diámetro de un grano de arena; y si esto es así, cien mil de estas criaturas vivas juntas no llegarían a formar un bulto igual al de un grano de arena». (Después precisa que un grano de arena tiene alrededor de un octavo de pulgada de diámetro, de lo cual

deduce que estos «minúsculos animales» miden tres micras de largo. Es decir, más o menos la longitud media de una bacteria. Su estimación fue de una precisión asombrosa.)

Si de pronto alguien nos dijera que ha visto una serie de maravillosas criaturas invisibles que nadie ha visto jamás, ¿le creeríamos? Oldenburg tenía sus dudas, como las tenía sobre las primeras descripciones que Leeuwenhoek hizo de aquellos «animáculos». Sin embargo, publicó su carta en 1677, una decisión que Nick Lane ha calificado de «un monumento extraordinario al escepticismo libre de prejuicios en la ciencia». Pero Oldenburg añadió una nota de advertencia en la que decía que la Royal Society quería detalles de los métodos de Leeuwenhoek para que otros pudieran confirmar sus inesperadas observaciones. No se puede decir que este cooperase. La técnica que empleaba en la fabricación de sus lentes era un secreto que guardaba celosamente. En vez de divulgarla, mostró los animáculos (seres vivos muy pequeños) a un notario, un abogado, un médico y otros hombres de buena reputación, que aseguraron a la Royal Society que, en efecto, vieron lo que él afirmaba. Mientras tanto, otros microscopistas intentaron emular su trabajo, pero fracasaron. Incluso el poderoso Hooke se esforzó al principio, y solo tuvo éxito cuando volvió a usar los microscopios de una sola lente que tanto odiaba. Su éxito corroboró las afirmaciones de Leeuwenhoek, y cimentó la reputación del holandés. En 1680, aquel mercero sin formación fue elegido miembro de la Royal Society. Y como todavía no sabía leer latín ni inglés, la institución acordó redactar su título de miembro en holandés.

Reconocido ya como el primer ser humano que vio microbios, Leeuwenhoek fue también el primero en ver los suyos. En 1683 halló una placa blanca y gruesa alojada entre sus dientes, y, cómo no, la

examinó con sus lentes. ¡Más seres vivos!, y «de movimientos muy elegantes». Había bastones largos con forma de torpedo que nadaban en el agua «como un lucio», y otros más pequeños que giraban como un trompo. «Todas las personas que viven en nuestros Países Bajos Unidos no son tantas como los animales vivos que este mismo día tengo en mi boca», declaró. Dibujó estos microbios, creando una sencilla imagen que se ha convertido en la Mona Lisa de la microbiología. Los estudió en las bocas de conciudadanos suyos de Delft: dos mujeres, un niño de ocho años y un anciano que nunca se había limpiado los dientes. Incluso agregó vinagre de vino a sus propias raspaduras y observó que los animáculos morían (primer caso de antisepsia documentado). Cuando murió en 1723, a la edad de noventa años, Leeuwenhoek se había convertido en uno de los miembros más famosos de la Royal Society. Legó a sus colegas una vitrina negra lacada que contenía 26 de sus asombrosos microscopios con especímenes montados. La vitrina desapareció misteriosamente, y nunca se recuperó; una pérdida sin duda muy lamentable, pues Leeuwenhoek jamás contó a nadie cómo fabricaba sus instrumentos.

## 4.2. El mundo invisible del tiempo profundo y la evolución.

L*a vida: Una biografía no autorizada* (Life: An Unauthorised Biography), escrito por el paleontólogo británico *Richard Fortey*, es una obra fundamental de divulgación científica que narra la historia de la vida en la Tierra a lo largo de casi 4.000 millones de años. El título «no autorizada» refleja la premisa central del autor: la historia de la evolución no tiene un guion predeterminado ni una meta superior encaminada hacia el ser humano. Es una crónica llena de contingencias, extinción masiva, suerte y adaptaciones impredecibles. Aun siendo verdad la premisa central del autor que la historia de la evolución no tiene un guión predeterminado, no podríamos aceptar el azar en toda la complejidad del ser humano, ni

adaptaciones impredecibles. Siempre seguiré pensando que los cinco elementos de la ratonera de Michael Behe en "*La caja negra de Darwin*" son necesarios y tienen que funcionar a la vez si se quiere cazar ratones. Ni tampoco aparece un trasatlántico en medio del desierto por suerte o por construcción masiva de organismos. Sin embargo, la vida es uno de los misterios. Siguiendo una visión afín a la de paleontólogos como Stephen Jay Gould, Fortey demuestra que la vida no progresa de forma lineal «de lo simple a lo perfecto». En las grandes extinciones, las especies no siempre sobreviven por ser las «más aptas», sino a menudo por encontrarse en el lugar y momento adecuados- -dice Fortey-. (Posiblemente se refiera al Cámbrico donde aparecieron especies completas en formas como en la actualidad)

Las herramientas que usábamos -dice el autor- eran martillos geológicos, lo suficientemente resistentes para soportar un infinito golpeteo sin astillarse, y lupas de mano para observar de cerca nuestros hallazgos. Algunos de ellos nos devolvían la mirada, porque ciertos trilobites habían conservado los ojos más antiguos: ojos compuestos, convexos, algunos tan grandes como los de las libélulas y con una miríada de lentes poligonales. Aunque separados por cientos de millones de años, aquellos trilobites y nosotros nos miramos los unos a los otros por primera vez y comprendí que difícilmente podría haber una metáfora mejor para el descubrimiento. Pronto nos dimos cuenta de que estos trilobites tenían que ser del Ordovícico (es decir, tenían aproximadamente 480 millones de años) porque pocos de ellos tenían parientes que reconociéramos de otros emplazamientos. Además, algunos de los lechos calizos contenían también fósiles de graptolitos, un bien conocido tipo de animal planctónico extinguido que cambiaba con cada periodo geológico de

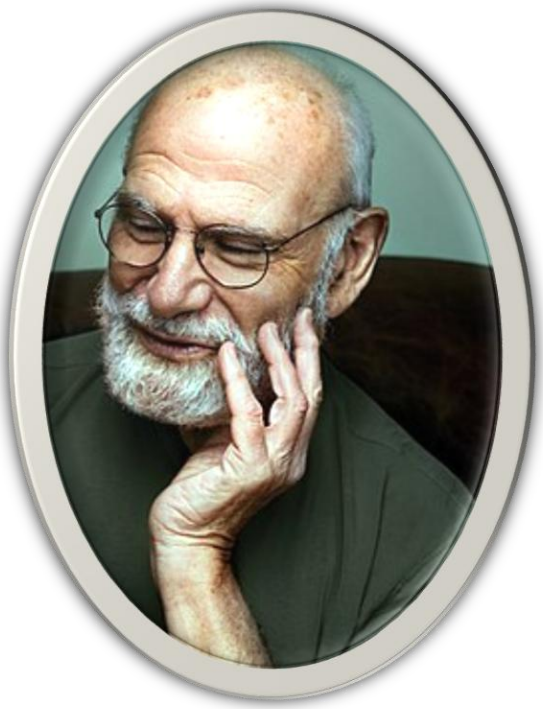
una forma que los estudiantes tenían que memorizar. Qué contentos nos sentimos entonces por haber embutido en nuestras mentes la letanía de especies que deletreaban el tiempo geológico. Pero incluso nuestros escasos conocimientos nos bastaron para darnos cuenta de que había tipos de fósiles en estas rocas que nunca antes habían sido vistos. No sabíamos cómo llamarlos, así que les pusimos apodos, nombres infantilizados como Mildred y Fred.

La narración de la vida requiere una escala de miles a millones de años, actuando sobre un drama de más de tres mil millones de años. Los geólogos permanecen indiferentes ante estas cifras; los "científicos" de la Creación simplemente no las creen. En verdad, es difícil captar tal inmensidad de tiempo porque es totalmente desproporcionada respecto de la breve duración de nuestra propia vida. La tentación es recurrir a metáforas familiares. Imaginemos que la historia del mundo esté representada, digamos, por la esfera de un reloj, entonces la aparición de las bacterias «verde azuladas» en el registro sucedió sobre las dos en punto, mientras que los invertebrados aparecieron hacia las diez; y la humanidad, como Cenicienta recordando súbitamente el final del baile, como un minuto antes de medianoche. No sé si tales imágenes son útiles más que como ilustraciones de enciclopedia. Hay dos escalas de tiempo: una relativa y una absoluta. La relativa es como la que Geoff y yo estábamos recomponiendo; este estrato de roca es más joven que el que está por debajo, y estratos más viejos yacen más profundamente en la columna de roca. Un rompecabezas del tiempo está compuesto pieza por pieza a partir de muchas secciones de roca como éstas. El tiempo está apilado en orden, periodo tras periodo. Los nombres que todos conocemos-Cretácico, Jurásico, Cámbrico- eran etiquetas aplicadas a grandes segmentos de esta escala relativa de tiempo

mucho antes de que se supiera cuántos años comprendía cada uno de ellos, o cuán lejos del presente quedaba el Cretácico.

Fortey, especialista en trilobites del Museo de Historia Natural de Londres, transmite la pasión del trabajo de campo: la búsqueda de fósiles en estratos rocosos, el olor de las rocas arcaicas y la capacidad de descifrar mundos desaparecidos a partir de una impronta petrificada. Las bacterias y arqueas no son un mero prólogo; gobernaron la Tierra durante más de la mitad de su historia. Fueron los estromatolitos y las cianobacterias los que oxigenaron la atmósfera y transformaron la química del planeta, permitiendo la aparición de organismos complejos. El Homo sapiens aparece apenas en las últimas páginas de este extenso recorrido. Fortey concluye que la humanidad es un recién llegado a un escenario que ha estado funcionando durante eones, proponiendo una perspectiva ecológica y humilde sobre nuestro lugar en la naturaleza.

## 12. MUNDOS INVISIBLES DE LA MENTE



El libro "*El hombre que confundió a su mujer con un sombrero*" (originalmente "Un hombre que confundió a su mujer con un sombrero y otros relatos" en inglés) es una colección de relatos clínicos y anecdóticos del neuropsicólogo y escritor *Oliver Sacks***,** publicado en 1973. El hombre que confundió a su mujer, es una obra fundamental de la literatura científica. A través de 24 historiales clínicos presentados como relatos humanos, Sacks explora la fragilidad de la mente y la capacidad de adaptación del cerebro ante pérdidas neuropatológicas severas. La tesis central del libro es que las enfermedades neurológicas no solo restan, sino que a veces transforman o revelan talentos insospechados, abordando al paciente desde la empatía clínica y no como un mero catálogo de síntomas. El libro lo divide en cuatro grandes temas y uno de ellos

seria de pacientes que pierden funciones cognitivas fundamentales. Es el caso del que da título al libro del Dr. P. que confundió a su mujer con un sombrero. El Dr. P. es un distinguido músico que padece agnosia visual. Ve detalles, pero no puede integrar las formas para reconocer caras ni objetos cotidianos. Al terminar la consulta, confunde la cabeza de su esposa con su sombrero e intenta ponérsela. Sacks descubre que el Dr. P. logra desenvolverse en la vida cotidiana convirtiendo cada tarea en un ritmo o una canción. El relato que hace Sacks es espléndido. Dice:

"El doctor P. era un músico distinguido, había sido famoso como cantante, y luego había pasado a ser profesor de la Escuela de Música local. Fue en ella, en relación con sus alumnos, donde empezaron a producirse ciertos extraños problemas. A veces un estudiante se presentaba al doctor P. y el doctor P. no lo reconocía; o, mejor, no identificaba su cara. En cuanto el estudiante hablaba, lo reconocía por la voz. Estos incidentes se multiplicaron, provocando situaciones embarazosas, perplejidad, miedo... y, a veces, situaciones cómicas. Porque el doctor P. no sólo fracasaba cada vez más en la tarea de identificar caras, sino que veía caras donde no las había: podía ponerse, afablemente, a lo Magoo, a dar palmaditas en la cabeza a las bocas de incendios y a los parquímetros, creyéndolos cabezas de niños; podía dirigirse cordialmente a las prominencias talladas del mobiliario y quedarse asombrado de que no contestasen. Al principio todos se habían tomado estos extraños errores como gracias o bromas, incluido el propio doctor P. ¿Acaso no había tenido siempre un sentido del humor un poco raro y cierta tendencia a bromas y paradojas tipo Zen? Sus facultades musicales seguían siendo tan asombrosas como siempre; no se sentía mal... nunca en su vida se había sentido mejor; y los errores eran tan ridículos (y tan

ingeniosos) que difícilmente podían considerarse serios o presagio de algo serio. La idea de que hubiese «algo raro» no afloró hasta unos tres años después, cuando se le diagnosticó diabetes. Sabiendo muy bien que la diabetes le podía afectar a la vista, el doctor P. consultó a un oftalmólogo, que le hizo un cuidadoso historial clínico y un meticuloso examen de los ojos. «No tiene usted nada en la vista», le dijo. «Pero tiene usted problemas en las zonas visuales del cerebro. Yo no puedo ayudarle, ha de ver usted a un neurólogo.» Y así, como consecuencia de este consejo, el doctor P. acudió a mí.

Qué hombre tan encantador, pensé. ¿Cómo puede tener algo grave? ¿Me permitirá examinarle?

—Sí, claro, doctor Sacks.

Apacigüé mi inquietud, y creo que la suya, con la rutina tranquilizadora de un examen neurológico: potencia muscular, coordinación, reflejos, tono... Y cuando examinaba los reflejos (un poco anormales en el lado izquierdo) se produjo la primera experiencia extraña. Yo le había quitado el zapato izquierdo y le había rascado en la planta del pie con una llave (un test de reflejos frívolo en apariencia, pero fundamental) y luego, excusándome para guardar el oftalmoscopio, lo dejé que se pusiera el zapato. Comprobé sorprendido al cabo de un minuto que no lo había hecho.

—¿Quiere que le ayude? —pregunté.

—¿Ayudarme a qué? ¿Ayudar a quién?

—Ayudarle a usted a ponerse el zapato.

—Ah, sí —dijo— se me había olvidado el zapato —y añadió, sotto voce—: ¿El zapato? ¿El zapato?

Parecía perplejo.

—El zapato —repetí—. Debería usted ponérselo. Continuaba mirando hacia abajo, aunque no al zapato, con una concentración intensa pero impropia. Por último, posó la mirada en su propio pie.

—¿Éste es mi zapato, ¿verdad?

¿Había oído mal yo? ¿Había visto mal él?

—Es la vista —explicó, y dirigió la mano hacia el pie—. Éste es mi zapato, ¿verdad?

—No, no lo es. Ése es el pie. El zapato está ahí.

—¡Ah! Creí que era el pie.

¿Bromeaba? ¿Estaba loco? ¿Estaba ciego? Si aquél era uno de sus «extraños errores», era el error más extraño con que yo me había tropezado en mi vida".

El relato sigue, pero yo me identifico mucho con lo que está narrando porque hace dos meses tuve una doble visión y siempre reímos el relato que le hice a mis nietos que llevaba en el coche a sus clases particulares.

_Nunca he visto una moto tan rara. Una moto encima de otra a toda velocidad. Cada vez hay más vehículos raros.

Mis nietos no me dijeron nada, pero después comentándolo nos reíamos porque una hora después vi un coche encima de otro y es que veía doble. La oftalmóloga me dijo que tenía importancia el tema pero que podría ver bien en pocos días. Los neurólogos me hicieron toda clase de pruebas y me mandaron a otro hospital a hacer una resonancia que me han hecho hace unos días. No paré de escribir en todo este tiempo, aunque cerraba un ojo para acertar con la tecla. Lo que si he sentido es que si el Dr. P. encontró en la música su realidad yo también me manejo ahora con más facilidad en lo abstracto. Dice Sacks: "Creo que para el Dr.P. la música había ocupado el lugar de la imagen. No tenía ninguna imagen corporal,

tenía una música corporal: por eso podía desenvolverse y actuar con la facilidad con que lo hacía, pero si cesaba la «música interior», se quedaba absolutamente desconcertado y paralizado. E igualmente con el exterior, el mundo. Se pregunta Sacks:¿Cómo hemos de interpretar esa extraña incapacidad del doctor P. para interpretar, para identificar un guante como un guante? Es evidente que, en este caso, a pesar de su facilidad para formular hipótesis cognitivas, no era capaz de hacer un juicio cognitivo. El juicio es intuitivo, personal, global y concreto: «vemos» cómo están las cosas, en relación unas con otras y consigo mismas. Era precisamente este marco, esta relación, lo que le faltaba al doctor P. (aunque su juicio fuese despierto y normal en todos los demás aspectos). ¿Se debía a una falta de información visual o a un proceso de información visual defectuoso?, (ésta habría sido la explicación de una neurología esquemática, clásica). ¿O faltaba algo en la actitud del doctor P., que le impedía relacionar lo que veía consigo mismo?

Curiosamente, aunque la neurología y la psicología hablen de todo lo demás, casi nunca hablan del «juicio» ... y sin embargo es en concreto el desmoronamiento del juicio (en sectores específicos, como en el caso del doctor P. o, de un modo más general, como en pacientes con el síndrome de Korsakov o con afectación del lóbulo frontal, lo que constituye la esencia de muchos trastornos neuropsicológicos. El juicio y la identidad pueden figurar en la lista de bajas... pero la neuropsicología jamás habla de ellos. Y sin embargo, sea en un sentido filosófico (el sentido de Kant) o en un sentido empírico y evolucionista, el juicio es la facultad más importante que tenemos. Un animal, o un hombre, pueden arreglárselas muy bien sin «actitud abstracta» pero perecerán sin remedio privados de juicio. El juicio debiera ser la primera facultad de la vida superior o de la mente,

y sin embargo la neurología clásica (computacional) lo ignora o lo interpreta erróneamente. Por supuesto el cerebro es una máquina y un ordenador: todo lo que dice la neurología clásica es válido. Pero los procesos mentales, que constituyen nuestro ser y nuestra vida, no son sólo abstractos y mecánicos sino también personales... y, como tales, no consisten sólo en clasificar y establecer categorías, entrañan también sentimientos y juicios continuos. Si no los hay, pasamos a ser como un ordenador, que era lo que le sucedía al doctor P. Y, por lo mismo, si eliminamos sentimiento y juicio, lo personal, de las ciencias cognoscitivas, las reducimos a algo tan deficiente como el doctor P.: y reducimos nuestra capacidad de captar lo concreto y real.

Otro de los casos es el del marinero perdido (Jimmie G.). Padece síndrome de Korsakoff debido al alcoholismo. Su memoria reciente quedó congelada en 1945; es incapaz de recordar nada que haya sucedido más allá de unos pocos segundos. “Un paciente mío en el que se ejemplifican concretamente esos interrogantes: el encantador, inteligente y desmemoriado Jimmie G., que fue admitido en nuestra residencia de ancianos próxima a la ciudad de Nueva York a principios de 1975, con una críptica nota de traslado que decía: «Desvalido, demente, confuso y desorientado».Jimmie era un hombre de buen aspecto, con una mata de pelo canoso rizado, cuarenta y nueve años, de aspecto saludable, bien parecido. Era alegre, cordial, afable.

—¡Hola, doctor! —dijo—. ¡Estupenda mañana! ¿Puedo sentarme en esta silla?

Era una persona simpática, muy dispuesta a hablar y a contestar cualquier pregunta que le hiciesen. Me dijo su nombre, su fecha de nacimiento y el nombre del pueblecito de Connecticut donde

había nacido. Lo describió con amoroso detalle, llegó incluso a dibujarme un plano. Habló de las casas donde había vivido su familia... aún recordaba sus números de teléfono. Habló de la escuela y de su época de escolar, de los amigos que había tenido y de su especial afición a las matemáticas y a la ciencia. Habló con entusiasmo de su época en la Marina, tenía diecisiete años, acababa de terminar el bachiller, cuando lo reclutaron en 1943. Dado su talento para la ingeniería era un candidato «natural» para la radiofonía y la electrónica, y después de un curso intensivo en Texas pasó a ocupar el puesto de operador de radio suplente en un submarino. Recordaba los nombres de varios submarinos en los que había servido, sus misiones, dónde estaban estacionados, los nombres de sus camaradas de tripulación. Recordaba el código Morse y aún era capaz de manejarlo y de mecanografiar al tacto con fluidez. Una primera parte de la vida plena e interesante, recordada con viveza, con detalle, con cariño. Pero sus recuerdos, por alguna razón, se paraban ahí. Recordaba, y casi revivía, sus tiempos de guerra y de servicio militar, el final de la guerra, y sus proyectos para el futuro. Había llegado a gustarle mucho la Marina, pensó que podría seguir en ella. Pero con la legislación de ayuda a los licenciados y el apoyo que podía obtener consideró que le interesaba más ir a la Universidad. Su hermano mayor estaba en una escuela de contabilidad y tenía relaciones con una chica, una «auténtica belleza», de Oregón.

Al recordar, al revivir, Jimmie se mostraba lleno de entusiasmo; no parecía hablar del pasado sino del presente, y a mí me sorprendió mucho el cambio de tiempo verbal en sus recuerdos cuando pasó de sus días escolares a su período en la Marina. Había estado utilizando el tiempo pasado, pero luego utilizaba el presente... y (a mí me

parecía) no sólo el tiempo presente formal o ficticio del recuerdo, sino el tiempo presente real de la experiencia inmediata. Se apoderó de mí una sospecha súbita, improbable.

—¿En qué año estamos, señor G.? —pregunté, ocultando mi perplejidad con una actitud despreocupada.

—En cuál vamos a estar, en el cuarenta y cinco. ¿Por qué me lo pregunta? —Luego continuó—: Hemos ganado la guerra, Roosevelt ha muerto, Truman está al timón. Nos aguarda un gran futuro.

—Y usted, Jimmie ¿qué edad tiene?

Su actitud era extraña, insegura, vaciló un instante. Parecía estar haciendo cálculos.

—Bueno, creo que diecinueve, doctor. Los próximos que cumpla serán veinte.

Al mirar a aquel hombre de pelo canoso que tenía ante mí, tuve un impulso que nunca me he perdonado... era, o habría sido, el colmo de la crueldad si hubiese habido alguna posibilidad de que Jimmie recordase. Al examinar su memoria me encontré con una pérdida extrema y sorprendente del recuerdo reciente, hasta el punto de que cualquier cosa que se le dijese o se le mostrase se le olvidaba al cabo de unos segundos. Por ejemplo, me quité el reloj, la corbata y las gafas, los puse en la mesa, los tapé y le pedí que recordase cada uno de estos objetos. Luego, después de un minuto de charla, le pregunté qué era lo que había tapado. No recordaba ninguno de los tres objetos... en realidad no se acordaba de que yo le hubiese pedido que recordase. Repetí la prueba, en esta ocasión haciéndole anotar los nombres de los tres objetos; se olvidó de nuevo y cuando le enseñé el papel con lo que había escrito él mismo se quedó asombrado y dijo que no recordaba haber escrito nada, aunque

reconoció que aquélla era su letra y luego captó un vago «eco» del hecho de que lo había escrito.

A veces retenía recuerdos vagos, un confuso eco o sensación de familiaridad. Así, cinco minutos después de que hubiese jugado al tres en raya con él, recordaba que «un médico» había jugado a aquello con él «tiempo atrás»... no tenía ni idea de si ese «tiempo atrás» había sido hacía minutos o hacía meses. Luego hizo una pausa y dijo: «¿Podría haber sido usted?». Cuando le dije que había sido yo pareció hacerle gracia. Este humor ligero y esta indiferencia eran muy característicos, lo mismo que las cavilaciones relacionadas a las que se entregaba al estar tan desorientado y perdido en el tiempo. Cuando le pregunté en qué época del año estábamos, miró a su alrededor buscando alguna clave (tuve la precaución de quitar el calendario del escritorio) y dedujo aproximadamente la estación mirando por la ventana. Ahora sé ya que la amnesia retroactiva es, hasta cierto punto, muy común, quizás universal, en casos de síndrome de Korsakov. El síndrome de Korsakov clásico (una devastación de la memoria profunda y permanente, pero «pura», debida a destrucción alcohólica de los cuerpos mamilares) es rara, incluso entre bebedores inveterados. Se puede detectar, por supuesto, el síndrome de Korsakov con otras patologías, como en los pacientes con tumores de Luria. Un caso especialmente fascinante de un síndrome de Korsakov agudo (y por fortuna pasajero) apareció bien descrito hace muy poco en la llamada Amnesia Global Transitoria (AGT), asociada con jaquecas, lesiones en la cabeza o riego sanguíneo deficiente del cerebro. En este caso puede producirse, durante unos minutos o durante horas, una amnesia grave y singular, aunque el paciente pueda seguir conduciendo un coche o incluso desempeñando sus tareas como médico o como

editor, de un modo mecánico. Pero bajo esta fluidez aparente hay una amnesia profunda, de tal modo que cada frase que se dice se olvida en cuanto se dice, se olvida todo a los pocos minutos de verlo, aunque puedan conservarse perfectamente rutinas y recuerdos bien asentados".

El mundo invisible del cerebro, del pensamiento o del sentido común es un mundo complejo que ni los especialistas aciertan a la primera. El ser humano puede trastornarse por varias razones como la hiperactividad o la sobreestimulación del sistema nervioso. Es el caso que cita Sacks sobre Ray, el Ticqueur (paciente con tic nerviosos) de los fines de semana, un hombre con síndrome de Tourette grave. Los tics le dificultan la vida cotidiana, pero le otorgan una improvisación genial al tocar la batería. Al usar haloperidol para controlar los tics, pierde su espontaneidad musical, lo que plantea un profundo dilema ético e identitario. También Sacks toca el misterio del arrebato con percepciones y alucinaciones. Casos de reminiscencias involuntarias y estados alterados de conciencia. Pacientes que escuchan canciones de su infancia de forma continua o experimentan crisis epilépticas en el lóbulo temporal que despiertan recuerdos intensos y visiones nostálgicas. También Sacks nos habla del mundo de los simples. Relatos sobre personas con discapacidades intelectuales severas o autismo que poseen habilidades extraordinarias (savants). Los gemelos matemáticos, dos hermanos incapaces de realizar operaciones aritméticas básicas pero capaces de evocar números primos de seis cifras de forma instantánea y visualizar calendarios a miles de años vista. Por todo esto Sacks aboga por una medicina "romántica" que devuelva al paciente al centro del historial médico.

En múltiples casos, la música y el arte actúan como el único medio para que personas con cerebros severamente fragmentados recuperen el orden y la identidad. La obra cuestiona dónde termina la personalidad de un individuo y dónde empieza su condición neurológica. Sacks describe los casos con detalle clínico, pero también con sensibilidad, como si fueran historias de vida. Demuestra que la neurología no es solo "cortar y pegar", sino entender cómo el cerebro procesa la experiencia humana. Aunque los casos son trágicos, el libro evita el sensacionalismo. Sacks muestra cómo la ciencia puede ayudar (aunque no siempre cure). Muestra cómo la neurología explica fenómenos que antes se atribuían solo a la psiquiatría. Inspira a entender la diversidad de la mente humana (desde el Alzheimer hasta los "extraños" síntomas que describe).

## 5.1. La vida interior, invisible, de la emoción y la conciencia

"¿Cuál es el error de Descartes? Para Antonio Damasio[9], uno de los más prestigiosos investigadores en neurofisiología, el de separar el cuerpo de la mente, con su tesis de que pensar es igual a ser, cuando se trata justamente de lo contrario: en el principio fue el ser, posteriormente el pensar; somos, luego pensamos. Creer que las operaciones más refinadas de la mente están separadas de la estructura y del funcionamiento del organismo biológico es un error, porque el cerebro y el resto del cuerpo constituyen un organismo indisociable integrado por circuitos reguladores bioquímicos y neurales que se relacionan con el ambiente como un conjunto, y la actividad mental surge de esta interacción. Esta innovadora visión del hombre se desarrolla en un libro que es, a la vez, riguroso y

[9] *El error de Descartes*. Antonio Damasio

accesible. Partiendo de casos reales y bien documentados, el autor nos lleva a comprender cómo se forman las imágenes que percibimos, cómo se depositan nuestros conocimientos, cómo opera la memoria, cómo actúan los mecanismos reguladores de nuestra vida, qué son las emociones y sentimientos y, en definitiva, nos proporciona los conocimientos esenciales sobre el funcionamiento del cerebro. Este libro que José Antonio Marina ha calificado de «relato intrigante» ofrece, en suma, la mejor síntesis disponible de los conocimientos neurológicos sobre un tema capital: la acción humana". Dice Damasio que empezó a escribir este libro para proponer que la razón puede no ser tan pura como muchos suponemos (o deseamos); que *emociones y sentimientos* quizás no son para nada intrusos en el bastión racional: que acaso estén enmarañados en sus redes para mal y para bien. Las estrategias racionales del ser humano, maduradas a lo largo de la evolución (y plasmadas en el individuo), no se habrían desarrollado sin los mecanismos de regulación biológica, de los que son destacada expresión las emociones y los sentimientos. En estos aspectos nos fijaremos, aunque no sea fácil de explicar.

Hace algo así como un siglo, William James, cuya perspicacia respecto de la mente humana rivaliza con la de Shakespeare y Freud, produjo una hipótesis verdaderamente asombrosa sobre la naturaleza de las emociones y sentimientos. Estas son sus palabras:

"Si sentimos una fuerte emoción, e intentamos abstraer de nuestra consciencia todos los sentimientos de sus síntomas corporales, nos encontramos con que no queda nada, ningún «material mental» que la pueda constituir; lo único que resta es un estado neutral y frío de percepción intelectual.

Y continúa James, con ejemplos muy convincentes:

¿Qué tipo de emoción de miedo quedaría si estuviera ausente la sensación de pulso acelerado, respiro afanoso, labios trémulos, extremidades débiles, carne de gallina y ruidos intestinales? Me resulta imposible pensarlo. ¿Cómo puedo imaginar un estado de rabia y no sentir la ebullición del pecho, el enrojecimiento facial, la dilatación de las narices, los dientes trabados, ningún impulso vigoroso y en cambio miembros laxos, respiración pausada y rostro plácido?

Con estas palabras, muy por delante de su tiempo y del nuestro, pienso que William James aprehendió el mecanismo esencial para comprender *la emoción y el sentimiento*. Por desgracia, y contra su costumbre, el resto de su propuesta es tan insuficiente ante la variedad y complejidad del tema elegido que ha sido fuente de interminables y de desesperanzadas controversias. El problema principal que algunos tuvieron con la concepción de James no es tanto el que despoje a la emoción y la defina como un proceso que involucra al cuerpo —quizá, de todas las cosas, la más chocante para sus críticos—, sino más bien el que atribuyera poco o ningún valor al proceso de evaluación mental de la situación que causa la emoción. Su descripción es adecuada para las primeras emociones que uno experimenta en la vida, pero no hace justicia a lo que ocurre en la mente de Otelo antes de desarrollar una ira celosa, o a lo que rumia Hamlet antes de excitarse el cuerpo según lo que percibirá como un disgusto, o a las tortuosas razones por las que Lady Macbeth llegó al éxtasis mientras impulsaba a su esposo a un delirio asesino.

Es importante insistir que para Antonio Damasio la mente y la conciencia no pueden entenderse de forma aislada sino como procesos biológicos. Esto es sin estar separados del cuerpo. Su enfoque rompe con el dualismo clásico al demostrar que el cerebro

utiliza los estados corporales para generar el pensamiento y la identidad. Damasio establece una separación fundamental entre estos dos conceptos, la cual es crucial para entender cómo interactúan el cuerpo y la mente. Para Damasio las emociones son respuestas químicas y neuronales automáticas ejecutadas por el cuerpo ante un estímulo específico (por ejemplo, el aumento del ritmo cardíaco ante una amenaza). Ocurren de manera física, externa y preconsciente en estructuras subcorticales del cerebro. Los sentimientos, una percepción consciente son la experiencia subjetiva y mental de esas emociones. Ocurren cuando el cerebro procesa y "mapea" lo que está sucediendo en el cuerpo física y químicamente, permitiéndonos notar conscientemente estados como la alegría, la tristeza o el miedo. También en este libro “El error de Descartes” Dmasio nos habla del marcador somático siendo las emociones las que intervienen también en la toma de decisiones.

Contrario a la idea tradicional de que las decisiones correctas se toman únicamente con la razón pura, Damasio demostró que las emociones son indispensables para decidir de forma eficaz. Antes de Damasio, los modelos clásicos de decisión en economía y psicología cognitiva tendían a concebir al ser humano como un agente racional puro, que evalúa opciones mediante cálculos lógicos de costos y beneficios. En cambio, la hipótesis del marcador somático sostiene que las señales corporales asociadas a las emociones —los llamados “marcadores somáticos”— guían o sesgan el proceso de decisión, especialmente en contextos complejos e inciertos. Esta idea revolucionaria sugiere que la interacción entre el cerebro y el cuerpo, a través de cambios fisiológicos ligados a estados emocionales, juega un papel crucial para seleccionar cursos de acción adaptativos. Los "marcadores somáticos" serían sensaciones

corporales asociadas a experiencias pasadas que actúan como alarmas o incentivos automáticos. Cuando nos enfrentamos a una elección, el cerebro simula rápidamente las respuestas del cuerpo ante las distintas opciones, lo que filtra de forma inmediata las malas alternativas mediante "corazonadas" o presentimientos antes de que intervenga el razonamiento lógico.

La arquitectura de la conciencia para Damasio, la conciencia no es un interruptor de encendido y apagado ni reside en una única zona cerebral; es un proceso evolutivo escalonado que surge directamente del tronco encefálico y los mapas corporales. Damasio divide la conciencia en tres niveles: Conciencia ampliada o autobiográfica, conciencia central y proto-si-mismo. La primera abarca la memoria, la identidad el pasado y futuro, permitiendo tener un sentido del pasado, hacer planes para el futuro y consolidar nuestra identidad o "yo autobiográfico". La segunda el aquí y ahora y el proto-si-mismo sería el inconsciente. Este sería el nivel más básico, completamente inconsciente y consistiría en la colección de mapas neuronales que el cerebro genera segundo a segundo para monitorizar el estado interno del organismo y mantenerlo con vida.

Para fundamentar sus teorías, Damasio no solo se basó en experimentos de laboratorio, sino en el análisis minucioso de pacientes con lesiones cerebrales específicas. Los casos de Phineas Gage y el paciente Elliot fueron los pilares para formular la Hipótesis del Marcador Somático, al demostrar que el daño en la corteza prefrontal destruye la capacidad de sentir emociones y, en consecuencia, arruina la toma de decisiones racionales. Aunque Phineas Gage vivió en 1848, Damasio y su esposa, la también neurocientífica Hanna Damasio, reconstruyeron su cerebro digitalmente más de un siglo después para entender qué le había

sucedido exactamente. Gage era un eficiente capataz de ferrocarriles. Una barra de hierro le atravesó el cráneo, entrando por la mejilla izquierda y saliendo por la parte superior de la cabeza. Sorprendentemente, Gage sobrevivió. Su lenguaje, su memoria, su inteligencia y sus facultades motoras quedaron intactas. Podía hablar y razonar formalmente. Sin embargo, su personalidad cambió por completo. Pasó de ser un hombre responsable, educado y sensato a ser alguien irreverente, caprichoso, incapaz de planificar el futuro y propenso a tomar decisiones destructivas. La barra de hierro había destruido la corteza prefrontal ventromedial (CPFVM). Damasio concluyó que esta zona es el puente entre las emociones corporales y el razonamiento. Al perder este puente, Gage mantenía la lógica intacta, pero sus decisiones ya no estaban guiadas por el "freno" o la "guía" de las señales emocionales.

El otro caso que cuenta Damasio es el de Elliot, un paciente que el propio Damasio trató directamente en su clínica y el protagonista del inicio de su libro *El error de Descartes*. Su caso confirmó de forma científica lo que Gage había sugerido. Elliot era un exitoso hombre de negocios, un esposo ejemplar y un padre cariñoso. Debido a un meningioma (un tumor cerebral), le extirparon tejido de la corteza prefrontal ventromedial (la misma zona dañada en Gage). Tras la cirugía, Elliot mantenía un cociente intelectual (CI) superior al promedio. Sus capacidades de memoria, atención, lógica y lenguaje eran perfectas. Superaba cualquier prueba de inteligencia formal con éxito. A pesar de su alta inteligencia, Elliot se volvió incapaz de tomar decisiones cotidianas. Podía pasar horas decidiendo dónde almorzar o qué criterio usar para archivar unos papeles, perdiéndose en bucles lógicos interminables. Invirtió todo su dinero en negocios absurdos que lo llevaron a la bancarrota, se

divorció y no lograba mantener ningún empleo. Al entrevistarlo, Damasio notó algo sorprendente. Elliot narraba las mayores tragedias de su vida con una absoluta frialdad emocional. Podía describir su ruina financiera y personal como si le hubiera ocurrido a otra persona. No sentía alegría, ni tristeza, ni frustración.

¿Qué demostraron estos casos sobre la mente humana? Damasio utilizó a Elliot y a Gage para derribar el dogma de que las emociones son "enemigas" de la razón. Estos casos demostraron tres principios biológicos. Al destruirse la corteza prefrontal ventromedial, el cerebro de Elliot ya no podía recibir las señales de alarma o aprobación que el cuerpo envía (como la aceleración cardíaca o la tensión muscular). Sin esas "corazonadas", todas las opciones posibles en su vida le parecían igualmente válidas, lo que paralizaba su capacidad de decidir. Elliot intentaba decidir basándose en la lógica pura y el análisis de costo-beneficio infinito. Damasio demostró que la razón pura nos vuelve extremadamente ineficientes; necesitamos el filtro rápido de la emoción para descartar opciones antes de ponernos a pensar. Ambos pacientes perdieron el sentido ético y social no porque olvidaran las leyes o las normas sociales (las recordaban perfectamente en los exámenes), sino porque perdieron la capacidad de sentir la incomodidad o la empatía asociada a romper esas normas. La conciencia puede definirse como la capacidad de tener experiencias subjetivas, de sentir, de ser consciente de uno mismo y del entorno. Es la base de nuestra identidad, de nuestra capacidad para interactuar con el mundo de manera significativa. Es importante distinguir entre la conciencia como un proceso activo y la mera presencia de sensaciones. La simple percepción de un objeto no implica necesariamente conciencia; un león que caza no está consciente de sí mismo ni de su acción. La conciencia requiere un

nivel de procesamiento cognitivo que involucre la interpretación, la evaluación y la integración de la información.

## 5.2. La música de los números primos

Marcus du Sautoy escribió *“La música de los números primos. El enigma de un problema matemático abierto*”. La obra del matemático británico Marcus du Sautoy, es un libro de divulgación científica. La obra narra la apasionante búsqueda histórica para desentrañar el patrón oculto y el significado de los números primos. El misterio de los números primos son los átomos de las matemáticas: números enteros mayores que 1 que solo pueden dividirse por sí mismos y por la unidad. No existe una fórmula simple o un patrón obvio para predecir cuándo aparecerá el siguiente número primo en la serie numérica. Su distribución parece tan caótica como un latido errático, lo que ha desconcertado a generaciones de científicos. En 1859, el brillante matemático alemán Bernhard

Riemann planteó una hipótesis revolucionaria sobre los "ceros" de su función zeta. Esta teoría sugiere que existe una armonía oculta — una especie de "música"— que rige la frecuencia y distribución aparente de los primos. Sigue siendo uno de los problemas abiertos más importantemente desafiantes y cotizados de las matemáticas modernas. Los números primos no son solo una curiosidad teórica; hoy en día blindan la seguridad informática y el comercio digital global mediante sistemas de cifrado (como RSA). Comprender su comportamiento conecta con campos tan diversos como la mecánica cuántica y la física atómica.

Marcus du Sautoy explica cómo los números primos forman la base secreta de las matemáticas y su misteriosa distribución. Es curioso que la seguridad de internet la protejan los números primos. Es fascinante cómo la teoría numérica más pura sostiene la economía digital global. Toda la seguridad de internet se basa en un concepto matemático muy simple: es extremadamente fácil multiplicar dos números primos grandes, pero casi imposible hacer el proceso a la inversa. Nos explica el autor de forma sencilla cómo funciona este escudo matemático, conocido como criptografía de clave pública (o algoritmo RSA). Cuando realizas una compra en línea o envías un mensaje encriptado, tu navegador utiliza dos claves distintas: una clave pública y otra privada. Es un número gigantesco (de cientos de dígitos) que todo el mundo puede ver. Sirve para cerrar el candado de tu información. La clave privada es el código secreto que se necesita para abrir ese candado. Solo la tiene el servidor de destino. *¿Dónde entran los números primos?* La clave pública (el número gigantesco) se crea multiplicando dos números primos enormes que se eligen al azar. Pero si multiplicas dos primos de 200

dígitos cada uno, una computadora actual tardará una fracción de segundo en darte el resultado (un número de 400 dígitos).

Si un pirata informático intercepta ese número de 400 dígitos, para descifrar tu mensaje necesita saber cuáles fueron los dos primos originales que lo generaron. A este proceso se le llama factorización. ¿Por qué es tan seguro? Actualmente, no existe ningún método matemático eficiente ni computadora lo suficientemente rápida en el mundo para factorizar un número tan grande en un tiempo razonable. Una computadora convencional tardaría miles de millones de años en probar combinaciones hasta encontrar los dos primos correctos. Por lo tanto, la seguridad de tus contraseñas, tus tarjetas de crédito y tus conversaciones no depende de un programa informático complejo, sino de la pura incapacidad humana y tecnológica para resolver este acertijo matemático a gran velocidad.

Marcus Sautoy nos pone algunos en un capítulo que titula “Las más de la mente”: “El nombre de Alan Turing estará asociado siempre a la decodificación de Enigma, el código secreto que usaban los alemanes durante la Segunda Guerra Mundial. En la tranquilidad de la enorme casa campestre de Bletchley Park, a medio camino entre Oxford y Cambridge, los descifradores de códigos de Churchill crearon una máquina que podía descifrar los mensajes que cada día mandaban los servicios secretos alemanes. La historia de cómo la irrepetible combinación de lógica matemática y determinación propias de Turing contribuyó a salvar muchas vidas de la amenaza de los submarinos alemanes ha sido objeto de novelas, obras teatrales y películas. Sin embargo, la inspiración que llevó a Turing a la creación de sus «bombas», las máquinas de descifrar, puede remontarse a sus tiempos de estudiante de matemática en Cambridge, cuando Hardy y Littlewood todavía estaban en activo.

Después de que sus colegas dedicaran años intentando en vano demostrar la hipótesis de Riemann, Turing creía que quizá había llegado el momento de indagar la posibilidad de que Riemann se hubiera equivocado: quizás existe realmente un cero fuera de la recta crítica de Riemann, y este cero tendría forzosamente que producir alguna modulación reconocible en la sucesión de los números primos. Turing era consciente de que las máquinas se convertirían en el instrumento más eficaz para la búsqueda de ceros que pudieran demostrar la falta de fundamento de la conjetura de Riemann; gracias a él, los matemáticos podrían gozar de la colaboración de un nuevo socio mecánico en su análisis de la hipótesis de Riemann. Pero no fueron sólo las máquinas materiales las que tuvieron un impacto en la exploración matemática de los números primos: sus máquinas de la mente, creadas inicialmente para atacar el segundo problema de Hilbert, traerían al final del siglo XX el más inesperado de los éxitos: una fórmula para generar todos los números primos.

La fascinación que las máquinas ejercían sobre Turing había sido estimulada por un libro que le regalaron en 1922, cuando tenía diez años: “Maravillas naturales que todos los niños deberían conocer”, de Edwin Tenney Brewster, estaba repleto de pequeñas perlas que excitaron la imaginación del joven Alan. El libro, que se había publicado en 1912, enseñaba que existían explicaciones de los fenómenos naturales y no se limitaba a nutrir de observaciones pasivas a sus jóvenes lectores. Si consideramos la pasión por la inteligencia artificial que más adelante desarrolló Turing, la descripción de los seres vivos que da Brewster resulta particularmente reveladora:

“Resulta evidente que el cuerpo es una máquina. Es una máquina enormemente compleja, muchas, muchas veces más

complicada que cualquier máquina que se haya construido jamás, pero es una máquina. Ha sido comparado con una máquina de vapor, pero esto sucedió antes de que consiguiéramos los conocimientos que hoy tenemos sobre su funcionamiento: en realidad se trata de un motor a gas; como el motor de un automóvil, de una lancha o de una máquina voladora". El primer gran logro de Turing: fue al concebir la idea de máquinas especiales que pudieran ser efectivamente hechas para comportarse como una persona o una máquina que hiciera cálculos aritméticos. Más tarde estas máquinas se harían famosas con el nombre de máquinas de Turing.

Hilbert había sido más bien impreciso sobre lo que entendía por una máquina capaz de establecer si un enunciado es demostrable o no; ahora, gracias a Turing, la cuestión planteada por Hilbert quedaba precisada: si una de las máquinas de Turing no podía discriminar lo demostrable de lo indemostrable, entonces ninguna máquina podría hacerlo. ¿Significaba esto que sus máquinas eran todo lo potentes que era necesario para afrontar el reto del problema de la decidibilidad de Hilbert? Un día, mientras corría junto al río Cam, Turing tuvo su segundo relámpago de inspiración y comprendió que ninguna de sus máquinas imaginarias podía ser capaz de distinguir entre los enunciados que tenían demostraciones y los que no las tenían. Mientras tomaba aliento, Turing comprendió que una idea ya utilizada con éxito para responder a una pregunta sobre los números racionales se podría aplicar a la cuestión de la existencia de una máquina capaz de verificar la demostrabilidad. La idea de Turing se basaba en un descubrimiento asombroso que había hecho en 1873 Georg Cantor, un matemático alemán de Halle: Cantor había descubierto que existen diversos tipos de infinito. Aunque parezca una proposición extraña, es realmente posible comparar dos

conjuntos infinitos y decir que uno es mayor que el otro. Cuando Cantor anunció sus conclusiones, hacia 1870, fueron consideradas casi como heréticas o, en el mejor de los casos, como las divagaciones de un loco.

La milagrosa maquina mental de Turing provenía de la revelación de Gödel quien abrió una cuestión totalmente nueva y empezó a fascinar tanto a Hilbert como al joven Turing: ¿existe alguna forma de establecer la diferencia entre los enunciados verdaderos para los que existen demostraciones y aquellos enunciados que, como Gödel había descubierto, son verdaderos aunque sean indemostrables? Turing, con su estilo pragmático, empezó a considerar la posibilidad de que existiera una máquina capaz de ahorrar a los matemáticos el riesgo de intentar demostrar un enunciado indemostrable. ¿Podía concebirse una máquina que, al introducirle cualquier enunciado, fuera capaz de establecer si podía ser deducido de los axiomas de las matemáticas, aunque sin dar la demostración? En caso de existir una máquina así, podría utilizarse a modo de oráculo de Delfos para tener la certeza de que la búsqueda de una demostración de la conjetura de Goldbach o de la hipótesis de Riemann no sería tiempo perdido. La cuestión de la existencia de un oráculo así no se apartaba mucho del décimo problema que Hilbert había planteado en los albores del siglo XX: en aquel problema, Hilbert había considerado la posible existencia de un método universal, de un algoritmo, capaz de decidir si una ecuación cualquiera tiene solución o no. Hilbert estaba concibiendo la idea de un programa de ordenador antes de que se planteara siquiera la idea misma de un ordenador.

Imaginó un procedimiento mecánico que pudiera aplicarse a las ecuaciones y respondiera «sí» o «no» a la pregunta «¿esta

ecuación tiene soluciones?», sin necesidad de ninguna intervención por parte del operador. Todos estos comentarios sobre máquinas eran puramente teóricos: nadie pensaba todavía en un objeto físico real. Eran máquinas de la mente, métodos o algoritmos para producir respuestas. Era como si se hubiera concebido la idea del software antes de que existiera un hardware capaz de hacerlo funcionar: aunque hubiera existido la máquina de Hilbert no habría sido de ninguna utilidad práctica porque, con toda probabilidad, el tiempo que habría necesitado para decidir si una ecuación cualquiera tenía solución hubiera superado la edad del universo. Para Hilbert, la existencia de esta máquina tenía una importancia filosófica. La idea de estas máquinas teóricas horrorizaba a muchos matemáticos: habrían puesto al matemático fuera de juego. Nunca tendríamos necesidad de confiar en la imaginación, en la intuición genial de la mente humana para producir argumentaciones inteligentes. El matemático quedaría reemplazado por un autómata cuya fuerza bruta abriría una brecha hacia la solución de nuevos problemas sin recurrir en absoluto a nuevas y sutiles formas de razonamiento. Hardy no tenía la menor duda de que nunca podría existir una máquina así; el simple pensamiento de que pudiera haber una ponía en peligro su propia existencia:

“Naturalmente, no existe un teorema así, y ello es una gran suerte, porque si existiera tendríamos un conjunto de reglas mecánicas para la resolución de todos los problemas matemáticos, y se habría terminado nuestra actividad de matemáticos. Sólo un observador externo muy ingenuo puede imaginarse que los matemáticos alcancen sus descubrimientos girando la manivela de cualquier máquina milagrosa”.

Turing se enteró de que uno de los matemáticos de Princeton le había ganado en el último momento: Alonzo Church había llegado a las mismas conclusiones casi al mismo tiempo que Turing, pero había sido más rápido en la publicación de su descubrimiento. Como es natural, Turing estaba preocupado por la idea de que su intento de obtener un reconocimiento en la jungla académica se frustrara por el anuncio de Church; pero gracias al apoyo de Newman, su mentor en Cambridge, también la demostración de Turing se aceptó para ser publicada. Para su desánimo, la publicación recibió una atención muy escasa; sin embargo, su idea de una máquina universal era mucho más tangible que el método que proponía Church, y tenía consecuencias de más largo alcance: la manía de Turing por los inventos materiales había prevalecido sobre las consideraciones teóricas. Aunque su máquina universal fuera sólo una *máquina de la mente*, la descripción que hizo de ella hacía pensar en el proyecto de una maquinaria real. La máquina universal supuso el comienzo de la era de la informática, que dotaría a los matemáticos de un nuevo medio con el que explorar el universo de los números. Incluso durante su vida, Turing comprendió el impacto que podrían tener las máquinas reales de cálculo sobre el estudio de los números primos; lo que no podía prever era el papel que jugaría su máquina teórica en el descubrimiento de uno de los tesoros más inaccesibles de las matemáticas. El análisis extremadamente abstracto que Turing hizo del problema de la decidibilidad de Hilbert se convirtió, decenios más tarde, en la clave del descubrimiento fortuito de una ecuación que genera todos los números primos".

¿Supone el ordenador la muerte de las matemáticas? -se pregunta Sautoy-. Si el ordenador sobrepasa nuestra capacidad de cálculo, ¿no convierte a las matemáticas en superflua?

Afortunadamente, no: lejos de anunciar el fin de las matemáticas, este hecho resalta la verdadera diferencia que se da entre el artista creativo que es el matemático y el ejecutor de tediosos cálculos que es el ordenador. No hay duda de que el ordenador es un aliado precioso de los matemáticos en la exploración de su mundo numérico y un experto sherpa en el ascenso al monte Riemann, pero también es cierto que no podrá tomar nunca el lugar de un matemático. Incluso si el ordenador puede ganar fácilmente al matemático en cualquier cálculo finito, le falta —todavía— la imaginación necesaria para comprender un mundo infinito y revelar la estructura y las regularidades que están en la base de las matemáticas.

Las notables competencias lingüísticas de Weil contribuyeron a su gran habilidad para crear un nuevo lenguaje matemático que le permitió articular sutilezas conceptuales inexpresables de otra forma. Pero fue precisamente su obsesión por las lenguas y, en concreto, su amor por el M*ahabbarata* —un antiguo texto sánscrito—, lo que, a principios de 1940, condujo a prisión al eminente joven matemático. El talento matemático de Weil se había manifestado claramente desde la infancia: su primera maestra hablaba de este alumno de seis años diciendo que «cualquier cosa que le explique sobre matemáticas, tengo la impresión de que ya la sabía». Su madre estaba convencida de que, si André era siempre el primero de la clase, no podría obtener ningún estímulo intelectual adecuado de parte de la escuela. Por tanto, se presentó a hablar con el director para insistir en que se hiciera avanzar varios cursos a su hijo. El director, estupefacto, respondió: «Señora, es la primera vez que una madre viene a quejarse de que las notas de su hijo son demasiado altas». Gracias al empuje de su madre, sin embargo, André se encontró en la clase de Monsieur Monbeig. Monbeig tenía una

concepción muy personal de la enseñanza, a la que Weil atribuye el mérito de sus progresos en el ámbito de las matemáticas. Por ejemplo, en lugar de hacer aprender la gramática de memoria, Monbeig había desarrollado un complejo sistema de notaciones algebraicas que desvelaba los esquemas que se escondían en las frases. Más adelante, cuando Weil conoció las ideas revolucionarias de Noam Chomsky sobre la lingüística, no halló nada que le pareciera especialmente nuevo. Weil admitió que «la adquisición precoz de familiaridad con un simbolismo no banal puede tener, sobre todo para un matemático, un alto valor educativo».

Las matemáticas se convirtieron en la pasión de Weil, casi su droga: «Una vez que sufrí una mala caída, mi hermana Simone pensó que la mejor forma de consolarme era traerme rápidamente mi libro de álgebra». El talento de Weil fue captado por una de las grandes leyendas de las matemáticas francesas: Jacques Hadamard, que se había hecho famoso a principios de siglo demostrando el teorema de los números primos de Gauss, animó a Weil a dedicarse a las matemáticas; así, a los dieciséis años, Weil ingresó en la Ecole Normale Supérieure, una de las academias parisienses creadas durante la Revolución francesa, para iniciar sus estudios profesionales como matemático.

Weil creía que la única forma de captar plenamente la belleza de cualquier texto —y no sólo de un poema épico— era leyéndolo en su lengua original. Pensaba que también en matemáticas era necesario releer los escritos originales de los maestros, evitando basarse sólo en las exposiciones posteriores de sus obras: «Estaba convencido que en la historia de la humanidad sólo cuentan los grandes genios, y que para conocerlos lo único que vale es el

contacto directo con sus obras», escribiría después en su autobiografía, Memorias de aprendizaje. Por ello se puso a estudiar la obra de Riemann: «Tuve una gran suerte de empezar por ahí, y siempre me he alegrado de ello». La hipótesis de Riemann sobre la naturaleza de los números primos marcaría la vida matemática de Weil.

Weil terminó sus exámenes en la Ecole antes de la edad de prestación del servicio militar obligatorio, y decidió viajar por las grandes ciudades matemáticas de Europa. Cruzó el continente a lo largo y a lo ancho —Milán, Copenaghe, Berlín, Estocolmo— asistiendo a clases y hablando con los pioneros de las matemáticas de aquella época. En Gotinga, que aún no había sido golpeada por las purgas académicas de Hitler, Weil ordenó en su mente las ideas básicas de lo que sería su tesis doctoral. En la ciudad natal de tres de los más grandes matemáticos europeos —Gauss, Riemann y Hilbert—, a Weil le pareció claro que París había perdido, en el ámbito matemático, la reputación de que había gozado en los grandes días de Fourier y de Cauchy. Ello se debía en parte porque muchos jóvenes matemáticos franceses que se hubieran podido convertir en figuras importantes en los años treinta habían muerto en la Primera Guerra Mundial: se había perdido una generación. Durante el verano de 1939 se trasladó a Finlandia con su mujer. Weil esperaba que Finlandia fuera un buen trampolín para huir a los Estados Unidos más adelante, pero resultó ser un grave error: la noche del 23 de agosto de 1939, Stalin firmó un pacto de no agresión con la Alemania nazi; a cambio de la neutralidad soviética, Hitler prometió a Stalin que le dejaría las manos libres en Estonia, Letonia, Polonia oriental y Finlandia. Al estallar la guerra, en septiembre de 1939, el gobierno finlandés sabía que muy pronto Finlandia sería

invadida; por tanto, todo lo que tenía que ver con la Unión Soviética se consideraba sospechoso. Cuando las autoridades interceptaron algunas cartas, llenas de ecuaciones incomprensibles, dirigidas a señas soviéticas por parte de un ciudadano francés, llegaron rápidamente a la conclusión de que este extranjero trabajaba para el enemigo. En septiembre de 1939, el francés fue arrestado bajo la acusación de ser un espía al servicio de Moscú.

La noche anterior a la fijada para la ejecución, el jefe de policía, con motivo de una cena de Estado, se encontró sentado junto a un matemático de la Universidad de Helsinki, Rolf Nevanlinna. Al llegar al café, el jefe de policía se dirigió a Nevanlinna: «Mañana fusilamos a un espía que dice conocerle. No me habría permitido molestarle por tan poca cosa, pero, al encontrarme ahora con usted, aprovecho la ocasión para pedirle su parecer». «¿Cómo se llama?», preguntó el académico. «André Weil», respondió el oficial. Nevanlinna se quedó con la boca abierta: durante el verano había hospedado a Weil y a su mujer en su propia casa de campo, junto al lago. «¿Es realmente necesario fusilarlo?», preguntó. «¿No pueden simplemente llevarlo hasta la frontera y expulsarlo?». «Es una idea; no lo había pensado». Así, gracias a este encuentro fortuito, Weil se ahorró la ejecución y las matemáticas se ahorraron la pérdida de uno de sus principales representantes en el siglo XX. En febrero de 1940, Weil estaba de nuevo en Francia, aunque languideciera en una prisión de Rouen a la espera de ser procesado por desertor. Uno de los placeres de las matemáticas consiste en que, para dedicarse a ella, no hacen falta muchos instrumentos: basta con papel, lápiz e imaginación. La prisión proporcionaba los dos primeros instrumentos y, en cuanto al tercero, Weil tenía de sobra. En su Noruega natal, Selberg había hallado en el aislamiento impuesto en los años de la guerra las

condiciones perfectas para dedicarse a las matemáticas. Trabajando en la India como contable, Ramanujan había desarrollado sus increíbles dotes matemáticas incluso sin haber tenido acceso a una formación académica. Bromeando con Weil, uno de los discípulos de Hardy, Vijayaraghavan —que había sido colega de Weil en la India—, le había repetido muchas veces: «si usted pudiera pasar seis meses o un año en la cárcel, ciertamente sería capaz de demostrar la hipótesis de Riemann». Ahora Weil estaba en condiciones de probar directamente las afirmaciones de Vijayaraghavan.

## 5.3. Explorando el Caos y la Complejidad

Ian Stewart[10] presenta una exploración ingeniosa y cautivadora de las intrincadas matemáticas de la teoría del caos. Incluye en su obra tres capítulos completamente nuevos que se centran en la predicción y el control de los sistemas caóticos, junto con nuevas perspectivas sobre nuestro sistema solar y una discusión exhaustiva de la teoría de la complejidad. El estilo accesible de Stewart hace que los complejos conceptos matemáticos sean comprensibles y entretenidos, pero reconociendo que muchas de las cosas son para entendidos. Ian Nicholas Stewart es Profesor en el Departamento de

[10] *¿Juega Dios a los dados*? Ian Stewart; *Historia de las matemáticas* - Ian Stewart; Los *grandes problemas matemáticos* - Ian Stewart; *17 ecuaciones que cambiaron el mundo*. Ian Steward

Matemáticas de la Universidad de Warwick, donde se dedica a mejorar la comprensión pública de las matemáticas y la ciencia. Reconocido por sus escritos de divulgación científica, explora conceptos matemáticos y sus implicaciones de manera accesible, haciendo que ideas complejas resulten comprensibles para un público más amplio. El *concepto de caos* se introduce a través de una experiencia personal de la infancia con una máquina para estirar el caramelo toffee. La lucha continua entre el orden y el caos es un aspecto fundamental de la percepción humana, reflejado en numerosos mitos de creación a través de las culturas. El caos se describe como un vacío primal del cual emerge el universo ordenado, vinculado a conceptos de bien y mal. A lo largo de la historia, las civilizaciones han buscado identificar leyes naturales a través de la matemática, la astrología y el mito, esforzándose por transformar fenómenos caóticos en patrones comprensibles. Antes de los años sesenta del siglo XX la palabra «caos» sólo tenía un significado: *desorden informe.* Pero desde entonces, descubrimientos fundamentales en ciencia y matemáticas le han dotado de un segundo significado más sutil, un significado que combina aspectos de desorden con aspectos de forma. Los Principios matemáticos de la filosofía natural de Newton habían reducido el «sistema del mundo» a ecuaciones diferenciales, y éstas son deterministas. Es decir, una vez que se conoce el estado inicial del sistema, su estado futuro en cualquier instante está determinado unívocamente.

La visión de Newton es la de un universo mecánico que, una vez puesto en marcha por la mano del Creador, sigue un curso único e inevitable. Es una visión que nos ha sido muy útil, gracias a la cual tenemos la radio, la televisión, los teléfonos móviles, los aviones comerciales, los satélites de comunicaciones, las fibras artificiales,

los plásticos y los ordenadores. En la *Guía de la galaxia de Hitchhiker* de Douglas Adams, el supercomputador “Pensamiento Profundo” se embarcaba en una búsqueda de cinco millones de años de duración en pos de la respuesta a la gran pregunta de la vida, el universo y todo lo que hay, y la respuesta a la vida que obtenía Douglas Adams es bien conocida: «42».En la novela de culto *Guía del autoestopista galáctico* del escritor británico Douglas, el 42 es la «respuesta definitiva a la gran pregunta sobre la vida, el universo y todo lo demás». El origen en la ficción es el de una supercomputadora llamada Pensamiento Profundo (Deep Thought) que tarda 7,5 millones de años en calcular esta respuesta. Cuando por fin la revela ("42"), los científicos se quedan desconcertados porque nadie sabe cuál es en realidad la pregunta exacta. El chiste principal de la obra es la absurda desconexión entre una respuesta matemática tan precisa y el misterio abstracto de la existencia. ¿Por qué eligió ese número el autor? Una broma simple: El propio Douglas Adams confesó años después que no había ningún significado oculto, base matemática ni referencia mística. Sin misterios: Simplemente estaba sentado en su escritorio mirando al jardín, pensó que "42" servía como un número ordinario y pequeño, y lo escribió.

Este incidente es una parodia de la famosa afirmación en la que Laplace resumió la visión matemática del determinismo: «Supongamos un intelecto que en un momento dado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y las posiciones mutuas de los seres que comprende; si este intelecto fuera suficientemente grande para someter sus datos a análisis, podría condensar en una única fórmula el movimiento de los cuerpos más grandes del universo y del átomo más ligero; para un intelecto semejante nada podría ser incierto, y el futuro tanto como el pasado estarían presentes ante sus

ojos». Luego devolvía de golpe a sus lectores a la tierra, al añadir: «La mente humana ofrece un pálido esbozo de esta inteligencia en la perfección que ha sido capaz de dar a la astronomía». El crecimiento del determinismo (azar) científico estuvo también acompañado por una creencia vaga pero profundamente arraigada en la «conservación de la complejidad». Esta es la hipótesis de que causas simples deben producir efectos simples, lo que implica que los efectos complejos deben tener causas complejas. Esta creencia nos hace examinar un objeto o sistema complejo y preguntar «de dónde procede la complejidad». ¿De dónde, por ejemplo, procede la complejidad de la vida, dado que debe haberse originado en un planeta sin vida? *Difícilmente se nos ocurre que la complejidad*[11] *podría aparecer por sí misma*, pero eso es lo que indican las últimas técnicas matemáticas.

El contexto histórico del caos está vinculado a estudios sobre osciladores forzados por Cartwright y Littlewood después de la Segunda Guerra Mundial, revelando que las dinámicas podrían ser ni predecibles ni periódicas. El mapeo de caballos de Smale (caballos de Troya) ilustra aún más el caos[12] al demostrar iteraciones complejas que conducen a patrones intrincados, lo que también conecta con los hallazgos anteriores de Poincaré. La investigación de Michel Hénon sobre el movimiento de estrellas en galaxias revela un comportamiento caótico inesperado que se aparta de las expectativas clásicas. Los hallazgos de Hénon a través de modelos computacionales introducen la noción de regiones caóticas rodeadas por islas de estabilidad, encapsulando la complejidad acumulada.

---

[11] Confrontando la complejidad. problemas de la reproducción. Bernd-Olaf Küppers; El concepto del valor de la vida bajo el paradigma de la complejidad… (Artículo) Autor Universidad de Carabob

[12] Masa crítica_ cambio, caos y complejidad - Philip Ball.

“Uno de los más importantes aspectos de la ciencia contemporánea es el enorme progreso que se ha logrado en la comprensión de los fenómenos complejos. Un ejemplo extraordinario de esto es el desarrollo de la biología moderna, que en el presente es tan rápido como el desarrollo de la física a principios de nuestro siglo. Sobre todo, los resultados de la biología molecular se han convertido en el punto focal de interés, porque han llevado a un entendimiento profundo de la base física de los organismos vivientes, incluyendo los principios físicos de la herencia. Además, los resultados de la biología molecular han inducido el desarrollo de una teoría física de la evolución y por ende el desarrollo de un concepto coherente del origen físico de la vida.[13] En otro lugar Küppers dice: “En otras palabras: el programa de investigación reduccionista comienza con la premisa cognoscente de que no hay una diferencia primordial entre la materia viva y la no-viva, y que la transición de lo no-vivo a lo vivo se debe considerar como algo casi continuo, en el que no están involucrados otros principios que no sean los principios generales de la física y de la química. Si hay ciertas limitaciones en cuanto a nuestra comprensión física de la materia viviente, entonces se supone que éstas tienen un carácter temporal pero no fundamental”,

El libro "Confrontando la complejidad: Problemas de reducción en biología"* de Bernd-Olaf Küppers aborda temas profundos sobre la relación entre biología, complejidad y evolución, y su crítica a los enfoques simplistas que ignoran estos aspectos. Este autor hace referencia a una idea central en su obra que es la distinción entre "no-vida" y "vida" desde una perspectiva que prioriza la “complejidad

[13] *Confrontando la complejidad. Problemas de reducción en biología*. Bernd-Olaf Küppers-

emergente” y los “propósitos funcionales” (como la muerte que es como parte esencial de la vida). Küppers argumenta que “la vida no es solo un conjunto de procesos químicos o físicos”, sino que surge de “estructuras auto-organizadas con propósitos intrínsecos (ej.: replicación, adaptación, muerte). La "no-vida" (como sistemas físicos o químicos sin propósito) carece de capacidad de autorreplicación y autogeneración. Para él, la muerte no es un accidente, sino un “mecanismo evolutivo” necesario para mantener la complejidad como la selección natural premia la supervivencia a corto plazo, pero la muerte garantiza la variación genética.

¿Qué dice Stewart sobre el azar en la ciencia? Stewart argumenta que el universo es un lugar donde el azar y el determinismo coexisten. En mecánica cuántica, las partículas siguen leyes probabilísticas como el principio de incertidumbre de Heisenberg, lo que sugiere que el futuro no está completamente determinado por el pasado. En cosmología, el Big Bang fue un evento con múltiples posibilidades iniciales como la densidad del universo o la fuerza de la gravedad, lo que introduce aleatoriedad en la formación de estructuras. El azar no es "caos" en el sentido estricto, pero sí imprevisibilidad. Stewart usa ejemplos como la evolución de especies (que él mismo describe como un proceso con elementos aleatorios, como mutaciones) o la formación de galaxias, donde la gravedad y el caos cósmico generan patrones complejos. Critica a quienes reducen la ciencia al determinismo puro como en "Dios no juega a los dados", (en la versión popularizada de Einstein), pero también alerta sobre el caos matemático como en sistemas dinámicos que se vuelven impredecibles a largo plazo.

El enfoque clave de Stewart es que no niega el determinismo en la física clásica, pero acepta que la probabilidad y el azar son

inevitables en escalas cósmicas y biológicas. Para él, el universo parece "jugar a los dados" en ciertos niveles (ej.: la formación de moléculas complejas, la evolución de la vida), pero esto no invalida la física subyacente. Stewart, desde la física, no niega la complejidad, pero la explica mediante procesos probabilísticos (ej.: el caos en la atmósfera o la selección natural). No siempre vincula la muerte con un propósito, sino con eventos aleatorios. Sobre Dios y los dados Stewart, es agnóstico y no niega la posibilidad de un universo gobernado por leyes físicas, pero admite que el azar juega un rol clave en fenómenos complejos (ej.: la vida). Stewart describe la evolución como un proceso probabilístico, pero Küppers argumentaría que la vida no es solo química, sino que tiene un ciclo de vida-muerte que permite la diversidad (ej.: la apoptosis en las células). Stewart, acepta que en la física clásica el futuro está determinado, pero en sistemas complejos (como la evolución) la probabilidad domina. Stewart sobre la "no-vida" y la vida no escribe específicamente sobre esto, pero su enfoque sobre el azar y la probabilidad sugiere la no-vida (sistemas físicos sin replicación) sería determinista o estocástica, pero sin los mecanismos que Küppers atribuye a la vida (ej.: muerte como selección). La vida, desde su perspectiva, sería un fenómeno emergente donde el azar (mutaciones) y la selección natural generan complejidad, pero sin necesariamente atribuirle un "propósito" explícito. Por ejemplo, en la evolución de bacterias resistentes a antibióticos es un proceso probabilístico, pero no necesariamente "intencional".Lo contrario serían las ideas de Richard Dawkins en (el gen egoísta) o incluso a enfoques en teología natural (como los de William Paley), donde la complejidad sugiere un diseño inteligente.

# 6. MUNDOS INVISIBLES DE LA COMPLEJIDAD

James Gleick es un reconocido escritor, periodista y divulgador científico estadounidense nacido el 1 de agosto de 1954 en Nueva York. Es mundialmente famoso por ser uno de los cronistas más influyentes en el ámbito de la ciencia moderna, la tecnología y los sistemas complejos, destacando por su habilidad para narrar temas técnicos en un lenguaje accesible y literario. Su enfoque narrativo de la no ficción científica sirvió de inspiración directa para construir el personaje de Ian Malcolm en la icónica novela y película *Jurassic Park*. En los años ochenta físicos, biólogos, astrónomos y economistas crearon un modo de comprender la complejidad en la naturaleza. La nueva ciencia, llamada caos, ofrece un método para ver orden donde antes sólo se observaba azar e irregularidad, traspasando las disciplinas científicas tradicionales y enlazando

especies inconexas de desorden, desde la turbulencia del tiempo atmosférico a los complicados ritmos del corazón humano, desde el diseño de los copos de nieve, a los torbellinos arenosos del desierto. A pesar de surgir de una ardua actividad matemática, el caos es un saber del mundo cotidiano: cómo se forman las nubes, por qué se eleva el humo o cuál es la razón de que el agua se arremoline en los ríos. “Caos” es el relato de una idea que espantó y embrujó a los científicos que se dedicaron a comprobarla. Acabada la lectura de *Caos*, no se ve el mundo con los mismos ojos”[14].

Para un matemático que se deleita en el caos diría que: «En lo estrafalario se está convirtiendo la matemática del mundo natural». El dramaturgo va más allá del desorden ordenado para abordar la tensión que se da entre el jardín inglés formal y una selva; entre lo clásico y lo romántico. El autor capta a la perfección la euforia que provoca a muchos jóvenes el descubrimiento del caos. No ve sólo la puerta abierta, sino también el paisaje que se extiende tras ella. “Esa realidad ordinaria que es nuestra vida, las cosas sobre las que escribe la gente poesía: las nubes, los narcisos, las cascadas o lo que ocurre en una taza de café cuando le echamos crema…; todas estas cosas están cargadas de misterio. Son tan enigmáticas para nosotros como lo era el firmamento para los griegos. El futuro es desorden. Una puerta así sólo se ha entreabierto cinco o seis veces desde que echamos a caminar sobre las patas traseras. ¿Qué mejor momento para estar vivo que éste, en el que casi todo lo que creíamos saber ha resultado estar equivocado?

Bar-Yam, hijo de un experto en física de partículas, había estudiado física de la materia condensada y, en 1997, tras abandonar

[14] *Caos. La creación de una ciencia*. James Gleick; *Viajar en el tiempo*. James Gleick; *La información.Historia y realidad.* James Gleick

la docencia en la Universidad de Boston, fundó el Instituto de Sistemas Complejos de Nueva Inglaterra. Había conocido la obra de Stephen Wolfram sobre autómatas celulares y la de Robert Devaney sobre el caos, y descubrió que los polímeros y superconductores le interesaban menos que las redes neuronales y la naturaleza de la civilización humana. «Reflexionar sobre la civilización —asevera— me llevó a pensar en la complejidad en cuanto entidad. ¿Con qué es comparable la civilización? ¿Con el latón?; ¿con una rana? ¿Cómo contestar a esa pregunta? Eso es lo que origina los sistemas complejos». La respuesta, es que se asemeja más a una rana que al latón, por el simple hecho de que evoluciona, y los procesos de adaptación que comporta este hecho son esenciales para el diseño y la creación de algo tan complejo que no puede descomponerse de forma eficaz en piezas independientes. Los sistemas socioeconómicos son como ecosistemas; de hecho, son ecosistemas. Cuenta James Gleick la siguiente parábola: “Tenemos un huerto, y gente que trabaja en él para recoger los frutos que ofrecen sus árboles. ¿Vale? Cosechan lo que les dan y lo llevan al mercado, y a continuación toca hacerse con la fruta que se encuentra en las ramas más altas. Resulta más difícil de alcanzar, y tal vez tiene un tamaño menor y un aspecto no tan bueno. Fabricamos escaleras y subimos a lo alto para cogerla, y a continuación recompensamos a quienes han hecho las escaleras”. Ilustra el cambio profundo que se ha producido en las dos últimas décadas en lo tocante a comprensión, por parte del público, de lo que constituye un problema científico legítimo.

Nos encontramos con una revolución en *el modo de ver*. El historiador de la ciencia Thomas S. Kuhn describe el experimento perturbador que un par de psicólogos efectuó en el decenio de 1940.

Dejaban que los sujetos echaran una fugaz ojeada a naipes de la baraja francesa, uno cada vez, y se les pedía que lo nombrasen. Había trampa, como se supondrá. Algunas cartas eran erróneas. Por ejemplo, un seis de picas rojas o una reina de diamantes negros. Nada parecía más sencillo. No parecían advertir la existencia de anomalías. Cuando se les mostraba un seis de picas rojas, anunciaban, ora «seis de corazones», ora «seis de picas». Comenzaron a vacilar cuando se les enseñaron a intervalos más espaciados. Notaron que había algo raro, pero no estaban seguros de qué era. Alguno decía que había notado algo anómalo, como, verbigracia, un corazón negro ribeteado de encarnado. Por fin, al hacerse más lenta la exhibición, la mayor parte de los sujetos alcanzó a distinguir la realidad. Vio los naipes falsos y efectuó la enmienda mental para no incurrir en equivocaciones. *Pero no todos*. Algunos experimentaron una sensación de desconcierto que les acarreó auténtico dolor. —No conseguí entender ese palo, sea cual fuere —dijo uno—. Ni siquiera me pareció un naipe. Ignoro ahora de qué color es, y si se trata de una pica o un corazón. Incluso no estoy seguro de cómo es una pica. ¡Cielo santo!

Muchos científicos que se volvieron a entender el caos en fecha temprana pueden hablar de desaprobación o de hostilidad declarada. Los estudiantes graduados fueron apercibidos de que pondrían sus carreras en un aprieto, si componían tesis emparentadas con una disciplina no sancionada, en la que sus mentores no eran expertos. Un físico atómico, al enterarse de la nueva matemática, podía entretenerse con ella motu proprio, atraído por su belleza, por su belleza y dificultad, pero jamás sería lo suficientemente osado para hablar de ello a sus compañeros. Los profesores más entrados en años creían que sufrían algo semejante a una crisis propia de la edad

madura, cuando se aventuraban en un linaje de investigación que muchos de sus colegas interpretarían mal o que les agraviaría. Pero, al propio tiempo, experimentaban la excitación intelectual que se deriva de lo verdaderamente nuevo. Incluso la sentían los profanos, los que armonizaban con la tendencia. Para Freeman Dyson, del Institute for Advanced Study, las noticias del caos fueron «como una descarga eléctrica» en el decenio de 1970. Otros imaginaron que, por primera vez en su vida profesional, presenciaban un cambio paradigmático, una transformación en el modo de pensar. Quienes reconocieron el caos desde el principio se debatieron en la agonía de cómo dar forma publicable a sus pensamientos y hallazgos. La tarea era ambigua: demasiado abstracta para los físicos y demasiado experimental para los matemáticos, por ejemplo. Algunos abarcaron lo revolucionario de la naciente ciencia gracias a la dificultad de comunicar las nuevas ideas y a la feroz resistencia que oponían las huestes tradicionalistas.

*El transistor* supuso una verdadera revolución en el campo de la electrónica, abriendo el camino de la tecnología hacia la miniaturización y la omnipresencia, y en poco tiempo supuso para sus tres principales inventores la concesión del Premio Nobel. En el siglo XIX, la palabra *energía* comenzó a experimentar una transformación similar: los filósofos naturales adaptaron un término que significaba vigor o intensidad. Lo matematizaron, dando al término energía su lugar fundamental en la visión de la naturaleza de los físicos. Lo mismo ocurrió con información. Fue necesario realizar un rito de purificación. Y luego, cuando fue simplificado, destilado y contado en *bits*, el término información comenzó a aparecer por todas partes. La teoría de Shannon tendió un puente entre información e *incerteza*; entre información y entropía; entre información y caos.

Condujo a los compact discs y a los aparatos de fax, a las computadoras y al ciberespacio, a la ley de Moore y a todos los Silicon Alleys del mundo. Nació el procesamiento de información, junto con el almacenamiento de información y la recuperación de información. Hoy día podemos comprobar que la información es por donde discurre nuestro mundo: es la sangre y la savia, el principio vital. Impregna de arriba abajo las ciencias, transformando todas las ramas del conocimiento. La teoría de la información empezó como un puente que llevaba de las matemáticas a la ingeniería eléctrica, y de allí a la informática. Sugieren que el bit es el núcleo irreducible, y que la información constituye el mismísimo centro de la existencia. Tendiendo puentes entre la física del siglo XX y la del siglo XXI, John Archibald Wheeler, el último colaborador que quedaba de Einstein y Bohr, fallecido en 2008, expresaba este manifiesto prácticamente en monosílabos oraculares: «It from Bit». Esto es, que, de los bits, de la información, «sale cada "eso", cada partícula, cada campo de fuerza» que pueda haber en el mundo, sale «incluso el propio continuo espacio-temporal»

El observador no solo observa, sino que también formula preguntas y hace afirmaciones que en último término deben ser expresadas en discretos bits. «Lo que llamamos realidad», decía Wheeler entre evasivas, «surge en el último análisis tras la formulación de cuestiones de *sí o no*». Y añadía: «Todas las cosas físicas son informativo-teoréticas en origen, y este es un universo participativo». Así pues, todo el universo es considerado un computador, una máquina cósmica que procesa información. Para resolver todo este enigma resulta clave un tipo de relación no contemplada por la física clásica: el fenómeno conocido como *entrelazamiento*. Cuando las partículas, o sistemas cuánticos, están

entrelazadas, en sus propiedades se observan correlaciones que trascienden el espacio y el tiempo. A distancia de años luz, comparten algo que es físico, pero no solo físico. Surgen escalofriantes paradojas, inextricables hasta que se comprende cómo el entrelazamiento codifica información, medida en bits o en su homólogo cuántico llamado graciosamente «qubit». Cuando fotones y electrones y otras partículas interactúan, ¿qué hacen realmente? Intercambiar bits, transmitir estados cuánticos, procesar información. Las leyes de la física son los algoritmos. Todas las estrellas candentes, todas las nebulosas silenciosas, todas las partículas que dejan su fantasmagórica estela en una cámara de niebla son unos procesadores de información. El universo computa su propio destino.

Hoy viajamos en el tiempo sin el menor problema, en nuestros sueños y en nuestro arte. Viajar en el tiempo nos parece una tradición ancestral, enraizada en viejas mitologías, tan viejas como los dioses y los dragones. Aunque los antiguos imaginaron la inmortalidad, la reencarnación y el reino de los muertos, las máquinas del tiempo escapaban a su comprensión. *El viaje en el tiempo es una fantasía de la era moderna.* Cuando Wells imaginó una máquina del tiempo en su habitación iluminada por una lámpara de aceite, estaba inventando también una nueva forma de pensar. ¿Por qué no antes? ¿Y por qué ahora? El viajero del tiempo empieza con una lección de ciencia. ¿O no es más que un sinsentido? Reúne a sus amigos junto a la chimenea del salón para explicarles que todo lo que saben del tiempo es erróneo. Son personajes arquetípicos de reparto: el médico, el psicólogo, el director, el periodista, el hombre silencioso, el muchacho muy joven y el alcalde de provincias, además del hombre serio favorito de cualquiera, «un personaje discutidor de pelo rojo» llamado Filby. «Deberán seguirme con mucha atención —

ordena a estos personajes estáticos el viajero del tiempo—. Tendré que contradecir una o dos ideas que están casi universalmente admitidas. Por ejemplo, la geometría que les enseñaron en el colegio está basada en un concepto erróneo». La geometría del colegio (la geometría euclidiana) tenía tres dimensiones, las tres que podemos ver: longitud, anchura y altura. Como es natural, los invitados tienen reservas. El viajero del tiempo prosigue a la manera socrática. Los bombardea con la lógica. Ellos oponen poca resistencia.

Unos pocos matemáticos muy inteligentes de la Europa continental ya estaban hablando como si las tres dimensiones de Euclides no lo fueran todo. Estaba August Möbius, cuya famosa «cinta» era una superficie bidimensional que hacía un giro por la tercera dimensión, y Felix Klein, cuya «botella» infinita implicaba una cuarta; estaban Gauss, Riemann y Lobachevsky, que pensaban, por así decirlo, de un modo poco convencional. Para los geómetras, la cuarta dimensión era una dirección desconocida perpendicular a todas nuestras direcciones conocidas. ¿Alguien puede visualizar eso? ¿Qué dirección es esa? Ya en el siglo XVII, el matemático inglés John Wallis reconoció la posibilidad algebraica de las dimensiones adicionales y las llamó «un monstruo de la naturaleza, menos posibles que una quimera o un centauro». Cada vez más, sin embargo, las matemáticas hallaban una utilidad a conceptos que carecían de significado físico. Podían interpretar su papel en un mundo abstracto sin necesidad de describir ninguna propiedad de la realidad. Bajo la influencia de esos geómetras, un maestro de escuela llamado Edwin Abbott Abbott publicó en 1884 su novelita fantástica *Planilandia: una novela de muchas dimensiones*, en la que unas criaturas de dos dimensiones intentan hacerse a la idea de una tercera; y en 1888 Charles Howard Hinton, yerno del lógico George

Boole, inventó la palabra «teseracto» para designar al equivalente tetradimensional del cubo.

H. G. Wells, en comparación con William Stead, un periodista sensacionalista, es muy sobrio y simple. Para él no hay misticismo alguno: la cuarta dimensión no es un mundo fantasmal. No es el cielo ni el infierno. Es el tiempo. Un hombre está al final de un pasillo donde hay mucha corriente, en el siglo XIX. A la luz parpadeante de una lámpara de queroseno examina una máquina hecha de níquel y marfil, con rieles de bronce y bielas de cuarzo, un armatoste feo y achaparrado, como desenfocado y nada fácil de visualizar para el pobre lector, pese a la lista de partes y materiales. Nuestro héroe juguetea con unas cuantas clavijas, añade una gota de aceite y se monta en la silla. Agarra una palanca con las dos manos. Va a emprender un viaje. Y nosotros también, por cierto. Cuando acciona la palanca, el tiempo rompe amarras. El hombre es anodino, casi carente de rasgos: «ojos grises», «cara pálida» y poco más. Ni siquiera tiene nombre. Solo es el viajero del tiempo: «pues será conveniente llamarle así». Tiempo y viaje: a nadie se le había ocurrido juntar esas dos palabras hasta entonces. ¿Y la máquina? Con su silla y sus barras, es como una bicicleta de fantasía. Todo ello es un invento de un joven entusiasta llamado Wells, que firma con sus iniciales, H. G., porque cree que suenan más serias que Herbert. Su familia le llama Bertie. Está intentando ser escritor. Es un hombre minuciosamente moderno, que cree en el socialismo, el amor libre y la bicicleta.

Orgulloso miembro del Club Turístico de Ciclistas, pasea arriba y abajo por el valle del Támesis en una bicicleta de 18 kilos con cuadro tubular y ruedas neumáticas, saboreando la emoción de montar su máquina: «Una memoria del movimiento persiste en los

músculos de las piernas, que parecen seguir girando y girando solas». En algún momento ve un cartel publicitario de un armatoste llamado «bicicleta casera para el aficionado»: una máquina estacionaria con ruedas de goma que permite al usuario pedalear para ejercitarse sin ir a ninguna parte. Mejor dicho, a ninguna parte a través del espacio. Las ruedas giran y el tiempo pasa. El siglo XX se cernía sobre el mundo, un hito del calendario con resonancias apocalípticas. Albert Einstein era un chaval en una escuela secundaria de Múnich. Habría que esperar a 1908 para que el matemático germano-polaco Hermann Minkowski anunciara su idea radical: «De ahora en adelante, el espacio en sí mismo, y el tiempo en sí mismo, están condenados a difuminarse como meras sombras y solo una especie de unión de ambos preservará una realidad independiente». H. G. Wells llegó allí antes, pero, a diferencia de Minkowski, no trataba de explicar el universo. Solo trataba de urdir una estratagema argumental verosímil para una narración fantástica.

El cielo podría estar en la cuarta dimensión; al fin y al cabo, los telescopios de los astrónomos no lo encontraban ahí arriba. La cuarta dimensión era el compartimento secreto de los fantasiosos y los ocultistas. «Nos hallamos en el umbral de la Cuarta Dimensión, ¡eso es lo que es!», declaró en 1893 William Stead, un periodista sensacionalista que había dirigido la Pall Mall Gazette. Según explicaba, se podía expresar mediante fórmulas matemáticas y se podía imaginar («si tiene usted mucha imaginación»), pero no se podía ver realmente o, al menos, no podía verla «el hombre mortal». Era un lugar «del que vislumbramos algo de vez en cuando en aquellos fenómenos que son del todo inexplicables por cualquier ley del espacio tridimensional». La clarividencia, por ejemplo. Y también la telepatía. Envió su informe a la Sociedad de Investigación Psíquica

para que investigaran más a fondo. Diecinueve años después embarcó en el Titanic y se hundió en el mar.

Wells, en comparación, es muy sobrio y simple. ¿Qué es el tiempo? El tiempo no es más que una dirección más, ortogonal al resto. Así de simple. Lo único que pasa es que nadie ha podido verlo hasta ahora: hasta el viajero del tiempo. «Pero debido a una flaqueza natural de la carne… tendemos a pasar por alto ese hecho», explica fríamente. «No hay ninguna diferencia entre el tiempo y cualquiera de las tres dimensiones del espacio, salvo que nuestra conciencia se mueve a lo largo de ella». En un plazo sorprendentemente corto esa noción pasó a formar parte de la ortodoxia de la física teórica. ¿De dónde provenía esa idea? Había algo en el ambiente. Wells intentaría recordar mucho después:

En el universo en el que habitaba mi cerebro en 1879 no existía ninguno de esos absurdos de que el tiempo sea espacio ni nada por el estilo. Había tres dimensiones, arriba y abajo, delante y atrás, y derecha e izquierda, y jamás oí hablar de una cuarta dimensión hasta alrededor de 1884. Entonces pensé que se trataba de una simple ocurrencia. Muy ocurrente. La gente del siglo XIX a veces se preguntaba qué es el tiempo. La pregunta surge en contextos muy distintos. Digamos que se quiere explicar la Biblia a los niños. El Educational Magazine publicaba en 1835:

Versículo 1. En el principio Dios creó el cielo y la tierra. ¿Qué quiere decir el principio? El principio del tiempo. ¿Qué es el tiempo? Una porción medida de la eternidad. Pero todo el mundo sabe lo que es el tiempo. Se sabía entonces y se sigue sabiendo ahora. También es verdad que nadie sabe lo que es el tiempo. San Agustín formuló esta pseudoparadoja en el siglo IV y la gente, conscientemente o no, se ha estado citándola desde entonces: “*Entonces ¿qué es el*

*tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé. Si quiero explicárselo al que me lo pregunta, no lo sé".*

## 6.1. Bernd-Olaf Küppers y la complejidad

El libro " de Bernd-Olaf Küppers15 aborda temas profundos sobre la relación entre biología, complejidad y evolución, y su crítica a los enfoques simplistas que ignoran estos aspectos. Hay una idea central en su obra: la distinción entre "no-vida" y "vida" desde una perspectiva que prioriza la complejidad emergente y los propósitos funcionales (como la muerte como parte esencial de la vida). Küppers argumenta que la vida no es solo un conjunto de procesos químicos

[15] "*Confrontando la complejidad: Problemas de reducción en biología*. Bernd-Olaf Küppers

o físicos, sino que surge de estructuras auto-organizadas con propósitos intrínsecos como la replicación, adaptación, muerte. La "*no-vida*" (como sistemas físicos o químicos sin propósito) carece de: capacidad de autorreplicación y autogeneración. Son sistemas que responden a estímulos con un objetivo como que un sistema que "muere" porque su función se satura. Para Küppers, la muerte no es un accidente, sino un mecanismo evolutivo necesario para mantener la complejidad, asi por ejemplo la selección natural premia la supervivencia a corto plazo, pero la muerte garantiza la variación genética. Küppers cuestiona enfoques que reducen la evolución a procesos (aleatorios) o puramente físicos como es el caso del darwinismo clásico sin considerar complejidad. Argumenta que la complejidad no es un accidente. Surgió como resultado de la coevolución de sistemas con propósitos (ej.: los genes, las proteínas, las células). La muerte es un "error" solo si no tiene función. Desde su perspectiva, la muerte es parte del mecanismo de selección que permite la diversificación (ej.: un organismo que vive demasiado tiempo no puede adaptarse a cambios ambientales). La vida no es solo "química", sino sistemas que buscan mantenerse en un estado de equilibrio dinámico (homeostasis). ¿Por qué la complejidad es clave para diferenciar vida/no-vida? Küppers defiende que la complejidad no es un rasgo opcional, sino esencial para la vida. Los sistemas vivos (ej.: células) se replican y se mantienen por sí mismos, con un ciclo de vida que incluye muerte. La vida emerge de la interacción entre entidades que compiten por recursos (ej.: mutación y selección natural). Sin muerte (o sin la capacidad de morir), la evolución perdería su mecanismo de renovación en el caso de poblaciones estancadas. En cambio, en los sistemas "no-vivos" como

estrellas, gases, no tienen estos rasgos. Su evolución es determinista (leyes físicas) y no requiere propósito.

Küppers parece alinearse con una visión donde la evolución no es solo aleatoria, sino que incluye sistemas que "quieren" sobrevivir, reproducirse o adaptarse. La muerte sería un mecanismo de control que actúa como un "reseteo" para permitir nuevas variaciones. Esto contrasta con el darwinismo clásico, que ve la evolución como un proceso puramente material sin propósito intrínseco. Esto recuerda a ideas de Richard Dawkins (el gen egoísta) o incluso a enfoques en teología natural (como los de William Paley), donde la complejidad sugiere un diseño inteligente. ¿Por qué la muerte es "lo mismo que la vida" para Küppers? Aquí está la esencia de su argumento. La muerte es inevitable en sistemas vivos (por definición), pero no es un "error". Es parte de la selección natural en organismos que mueren sin reproducirse no contribuyen a la evolución. Sin muerte, la vida podría estancarse en especies que se adaptan demasiado bien a un entorno. La muerte permite la variación genética como en las mutaciones en células que mueren y se reemplazan. Para él, la vida no es solo supervivencia, sino un ciclo de vida-muerte que mantiene la diversidad y la capacidad de adaptación. ¿Es esta una postura radical? Küppers no es el único que cuestiona el darwinismo clásico en este sentido. Otros autores como Mayr[16] o Dennett[17] comparten ideas similares, donde se reconocen “intenciones emergentes”. Estudios que muestran cómo la complejidad emerge de la interacción de partes simples. Sin embargo, Küppers es más explícito al decir que la muerte es parte

[16] *The Growth of Biological Thought*. Ernst Mayr
[17] *Darwin's Dangerous Idea*. Daniel Dennett

esencial de la vida, algo que el darwinismo clásico suele tratar como un "problema" como en la "paradoja de la selección natural".

Para Küppers, la no-vida sería un sistema que no se replica como una estrella que se agota. Un sistema que no tiene propósito como un gas en equilibrio termodinámico. Un sistema donde la muerte no es un mecanismo de selección (ej.: un cristal que se forma y se congela sin variación). En cambio, la vida sería un sistema que se replica y se autorregula como el ADN, o las proteínas. Tiene un ciclo de vida-muerte que permite la evolución emergiendo complejidad funcional como un corazón que sabe extraer una cantidad muy alta del oxígeno en cada necesidad.

Aunque Küppers tiene argumentos fuertes, también hay objeciones. ¿Puede la evolución tener propósito si todo está gobernado por leyes físicas? (Esto es un debate abierto en filosofía de la ciencia porque sería la naturaleza Dios). Algunos argumentan que la vida sí es solo química, y la complejidad emerge de procesos físicos. Es evidente que la “química prebiótica” no es vida sería solo química azarosa. ¿Cómo mediríamos un "propósito emergente" en sistemas biológicos? Para Küppers, la teoría física de la evolución (sin considerar complejidad o propósito) es incompleta porque ignora que la vida no es un accidente, sino un fenómeno emergente de sistemas autopoiesis. La autopoiesis resuelve la pregunta anterior sobre el mundo prebiótico. Cuando una estructura química se convierte en un ser vivo en el momento exacto en que es capaz de producirse y mantenerse a sí misma. Y esto por la gracia de lanaturaleza que sería el Dios creador. De lo contrario seria un reloj sin relojero, un trasatlántico en el desierto, llegados por obra del azar que no tiene propósito. Sin embargo, para Küppers la vida no es solo sistema con propósito, autopoiesis y muerte como parte de su

dinámica. La "no-vida" carece de estos rasgos, y por eso Küppers cuestiona que la evolución sin ellos sea una explicación suficiente.

El punto de referencia de esta discusión no será el problema mente-cerebro, sino el problema más general de la transición de lo no-vivo a lo vivo. Este último es casi paradigmático para el desafío que la biología ha lanzado a la física, y su análisis durante los años recientes ha llevado por completo a nuevos discernimientos acerca de las posibilidades y las limitaciones sobre la comprensión de la complejidad biológica. El problema de la comprensión de la complejidad se aborda de la siguiente manera: primero se muestra qué tipo se debe sentir, pues, si la visión reduccionista del mundo es correcta y todos los fenómenos biológicos pueden -por lo menos en principio- ser explicados por las leyes de la física, parece que se puede llegar a la conclusión ontológica de que la vida no es más que una articulación compleja de un gran número de átomos y moléculas. De acuerdo a esta imagen, aun el fenómeno de la conciencia puede ser considerado como una consecuencia directa de la complejidad material, una complejidad que se piensa está gobernada exclusivamente por las leyes físicas. Ahora, para autoinmunizarse de esta visión impaciente del mundo sacada del reduccionismo, algunos biólogos y filósofos de la ciencia, asociados, han inventado el concepto de "emergencia", y muy ligado a éste, el concepto de la "causación descendente". La idea principal detrás de estos conceptos se puede resumir en el reclamo general de que si un sistema material llega a un cierto grado de complejidad, que se manifiesta por un alto

grado de relación entre sus componentes, entonces pueden emerger propiedades y procesos novedosos y auténticos, los cuales no pueden ser explicados por las propiedades materiales de los componentes mismos. En consecuencia, los emergentistas claman que la física no es una herramienta suficiente para la explicación de fenómenos complejos, aunque sí necesaria.

## 6.2. El mundo invisible de lo sagrado

Peter Kingsley[18] nos inicia en un fascinante recorrido filosófico que transforma radicalmente nuestra visión de la Grecia antigua. Allí donde creíamos ver solamente el origen de la filosofía occidental, nos encontramos con un sustrato religioso en donde los «iatromantes» y sacerdotes de Apolo conducen a los iniciados hacia un saber encaminado a transmutar el concepto de lo real. Kingsley, que despoja su investigación de todo ropaje académico, nos ofrece una seductora narración que nos transportará a esos oscuros lugares bajo tierra en donde los ritos de «incubación» y quietismo fueron el origen del mensaje metafísico de Parménides, cuyo contenido sapiencial, según Kingsley, se ha intentado ocultar, a partir de Platón,

[18] *En los oscuros lugares del saber*. Peter Kingsley

tanto del poema de Parménides como del contexto del cual procede. El autor nos habla del despertar algo olvidado, algo que nos han hecho olvidar con el paso del tiempo aquéllos que no lo entendieron o que, por motivos propios, quisieron que lo olvidáramos. Podría decirse que este proceso de despertar es profundamente sanador si no fuera porque hemos llegado a una idea de salud tremendamente superficial. Para la mayoría de nosotros, la curación es lo que hace que nos sintamos cómodos y lo que alivia el dolor. Es lo que mitiga, lo que nos protege. Y, sin embargo, con frecuencia aquello de lo que queremos ser sanados es lo mismo que nos curará si podemos soportar la incomodidad y el dolor.

A muchos nos preocupa la extinción de todas las especies que el mundo occidental está exterminando. Pero casi nadie se da cuenta de lo más extraordinario de todo: de la extinción de nuestro conocimiento de lo que somos. Este conocimiento desaparecido, está relacionado con el pasado. Y, sin embargo, no tiene nada que ver con éste tal como lo conocemos. Somos el pasado. Incluso nuestras “mañanas” son una expresión del pasado. Nos gusta pensar que podremos avanzar hacia el futuro y dejar atrás la historia, pero no es posible. Sólo entraremos en el futuro cuando nos enfrentemos al pasado y nos convirtamos en lo que somos. Empezaremos conociendo a unos comerciantes, exploradores, piratas. Quienes los han estudiado los denominan los vikingos de la antigüedad clásica. Fueron los más osados aventureros de todos los antiguos griegos e intentaron ir más allá de las fronteras de lo desconocido. Convirtieron en realidad lo que para otros era un sueño. Se llamaban foceos y el nombre de su ciudad era Focea. La situación de Focea era privilegiada, cerca del extremo occidental de la ruta de las grandes caravanas que se extendía a lo largo de miles de kilómetros; partía

del Mediterráneo, cruzaba Anatolia y Siria y alcanzaba el Golfo Pérsico. Éste era el famoso Camino Real: la ruta que utilizaron durante siglos los reyes de Asia occidental y de Persia, siguió después Alejandro Magno y, mucho más tarde, tomarían los cristianos para difundir su mensaje. Con todo, esto es sólo una pequeña parte de la historia. Los mayores expertos han averiguado algo que cuesta admitir: en realidad, los descubrimientos más famosos de Pitágoras no fueron tales: hacía ya siglos que se conocían en Babilonia y el mayor mérito de Pitágoras fue llevar esos conocimientos a Grecia y adaptarlos al mundo de los griegos.

Hacia el año 540 a. d. C. algo sucedió en Focea. No puede decirse que fuera inesperado, ya hacía tiempo que los foceos pensaban que algún día iba a pasar. Incluso sus interlocutores comerciales del Atlántico les habían dado una fortuna para que erigieran una muralla defensiva. Pero algunas cosas no se pueden cambiar, por mucho que se vean venir. Los foceos llevaban años comerciando con Persia y seguirían haciéndolo durante los años venideros. En cualquier caso, comerciarían quienes terminaran por encontrar el modo de regresar a la ciudad y mantenerla viva, aunque como una sombra de lo que había sido. Sin embargo, en aquel momento la situación había cambiado. Por motivos religiosos, económicos y políticos —pero, en última instancia, todo se reducía a la religión—, Persia quería extender su imperio hasta los confines de la tierra. Los persas estaban sedientos. Ya no querían comerciar con Focea: querían ser dueños de Focea. Así pues, habían ido de Focea a Delfos para pedir consejo, y Apolo sugirió que fundaran una ciudad en Cirno o, al menos, eso es lo que creyeron entender. Cirno era el nombre griego de Córcega y allí decidieron irse. Veinte años más tarde, los foceos acordaron, por segunda vez, navegar hasta

Córcega, pero en esta ocasión el pacto no fue lo bastante fuerte. A pesar de los persas, a pesar del juramento sobre el hierro y el mar, la mitad de la población no pudo ir: les resultaba demasiado doloroso dejarlo todo atrás, sentían demasiada nostalgia de su tierra. Regresaron y se inclinaron ante los persas, aplastados por la maldición del juramento roto.

Peter Kingsley también nos dice que lo que NO tenemos delante de los ojos es más real que lo que vemos y eso es así en todos los niveles de la existencia. Lo que falta es más poderoso que lo que tenemos delante de los ojos. Todos lo sabemos. El único problema es que la ausencia es demasiado difícil de soportar, de manera que, en nuestra desesperación, inventamos cosas para echarlas de menos. Todas son sucedáneos temporales. El mundo nos llena de sucedáneos e intenta convencernos de que nada falta, pero nada tiene la capacidad de llenar el vacío que sentimos en nuestro interior, de manera que tenemos que ir sustituyendo y modificando lo que inventamos mientras nuestro vacío proyecta su sombra sobre nuestra vida. La misma situación se da con frecuencia en quienes no han conocido a su padre. El progenitor desconocido proyecta un encantamiento sobre los rincones más recónditos de la existencia del hijo y éste está siempre a punto de encontrarlo en forma de algo o de alguien, pero nunca lo consigue. Pero en mitad de todas estas incertidumbres, hay una cosa segura: la existencia de ese hombre cuya importancia fundamental en la formación de la historia de las ideas occidentales está fuera de toda duda. A través de él comprendemos lo que sucedió en realidad en nuestro pasado. Si lo entendemos, nos encontraremos en situación de empezar a entender muchas otras cosas. Se llamaba Parménides y era de Elea.

No nos ha llegado ninguna fecha fidedigna en relación con Parménides, sólo tenemos vagas indicaciones; pero son lo bastante buenas. Éstas sugieren que nació no mucho después de la llegada de los foceos al sur de Italia procedentes de Oriente y que se encontraba entre la primera generación de niños criados en Elea por sus padres foceos, por cuyas venas fluían los recuerdos del viaje y de Focea. En otro de sus diálogos imaginarios, Platón hace que Sócrates describa la figura de Parménides. “Me pareció, citando a Homero, alguien “digno de mi reverencia y respeto”. Pasé algún tiempo en compañía de este hombre, cuando yo era muy joven y él muy viejo, y me dio la impresión de que poseía una profundidad nobilísima en todos los sentidos. Esto me hace temer que no sólo no seamos capaces de entender lo que dijo, sino que todavía comprendamos menos lo que quiso decir.” El retrato es impresionante y, sin embargo, muy oscuro. Parménides escribió un poema. Sería fácil imaginar al padre de la filosofía haciendo todo tipo de cosas, pero se limitó a escribir un poema. Lo escribió en la métrica de los grandes poemas épicos del pasado, una poesía creada bajo la inspiración divina, que revelaba lo que los seres humanos, por sí mismos, jamás podrán ver o conocer, que describía el mundo de los dioses y el mundo de los seres humanos y el encuentro entre seres humanos y dioses.

El viaje que describe es mítico, un viaje a lo divino con ayuda de lo divino. No es un viaje como otro cualquiera. Pero que sea mítico no quiere decir que no sea real. Al contrario, cualquiera que haga el viaje descubre que los viajes a los que estamos acostumbrados son los irreales, porque nuestra conciencia nunca se desplaza, nunca cambia. Cuando andamos calle abajo, en realidad no vamos a ningún lado. Podemos viajar por todo el mundo sin ir a ninguna parte. Nunca

vamos a ninguna parte; si creemos lo contrario es porque estamos atrapados en la red de las apariencias, en la red de nuestros sentidos. Se dice que los personajes divinos sólo son símbolos de su capacidad de razonamiento —era, al fin y al cabo, un filósofo— y el viaje mismo es una alegoría de su batalla para salir de la oscuridad y llegar a la luz, de la ignorancia a la iluminación intelectual. Y el hecho es que Parménides nunca se describe a sí mismo saliendo de la oscuridad camino de la luz. Si se sigue lo que dice, se ve que iba justo en *dirección contraria*. A lo largo de toda la antigüedad, los más destacados intérpretes —de oráculos, de los auspicios de la existencia, de cómo cantaban y volaban los pájaros— sabían que la mayor parte de la interpretación consistía no en interferir sino en mirar, escuchar y permitir que las cosas observadas revelaran su significado. Parménides no dice de entrada quiénes son esas jóvenes que lo guían en su viaje. Era un poeta demasiado bueno para decirlo. Como los mejores poetas griegos anteriores, sabía emplear la técnica del suspense y la explicación gradual. Al final dice quiénes son, pero no al principio. Salieron a la luz para buscarlo y ahora se lo llevan a otro sitio. Salieron de las Moradas de la Noche y ya sabemos, gracias a los grandes poetas griegos, dónde están estas moradas. Están en las profundidades, en los confines de la existencia, allí donde el cielo y la tierra tienen sus raíces; están en el Tártaro, el lugar al que incluso los dioses temen ir.

Así pues, Parménides viaja a los infiernos, a las regiones del Hades y del Tártaro, allí de donde no regresa casi nadie. Y en cuanto empieza a entenderse esto, todos los detalles encajan en su sitio. Parménides viajaba en dirección a su propia muerte de manera consciente y voluntaria; y la única manera de describirlo es empleando el lenguaje del mito, porque el mito es justamente el

mundo de significado que hemos dejado atrás. Así lo expresa Parméndes: “Y la diosa me dio la bienvenida amablemente, me cogió la mano derecha entre las suyas y me dijo estas palabras: «Seas bienvenido, joven, compañero de inmortales aurigas, que llegas a nuestra casa con las yeguas que te llevan. Porque no ha sido *hado funesto* el que te ha hecho recorrer este camino, tan alejado del transitado sendero de los hombres, sino el derecho y la justicia. Y es necesario que te enteres de todo: tanto del inalterado corazón de la persuasiva Verdad como de las opiniones de los mortales, en las que no hay nada en que confiar. Pero aprenderás también esto: cómo las *creencias basadas en apariencias* deben ser verosímiles mientras recorren todo lo que es». o primero que hace la diosa después de que Parménides llegue es tranquilizarlo y decirle que aquello que lo ha llevado hasta ella «*no ha sido el hado funesto*». Estas palabras, «hado funesto» tenían un sentido muy específico en griego clásico. Era una expresión habitual para referirse a la muerte.

Esta frase tranquilizadora no tendría sentido a menos que hubiera buenos motivos para suponer que lo llevaba la muerte hasta ella. La diosa dice, sin decirlo claramente, que uno sólo llega a donde él ha llegado si está muerto. Así pues, eso es lo que Parménides ha hecho: ha recorrido la vía de la muerte mientras todavía está vivo, ha ido hasta donde van los muertos sin morirse. Para cualquier otro, el lugar al que ha llegado sería mortal. En época de Parménides se entendía que la fuerza bruta y el valor no bastaban para llevar a un héroe hasta el mundo de los muertos. Tenía que saber lo que hacía, adónde iba; dónde estaba en relación con los dioses. Tenía que haber sido iniciado en los misterios del inframundo. Lo mismo sucede con Parménides. Justo al principio de su poema dice que es «un hombre que sabe». Hace ya tiempo que los estudiosos se han dado

cuenta de que en griego clásico era una manera habitual de referirse a los iniciados, a los que saben cosas que otros ignoran y, por ese motivo, saben que pueden ir allí donde otros no querrían ir. Y a ellos se les da la bienvenida, en el mundo de los muertos, con tanta amabilidad y calidez. En el poema de Parménides hay muchos otros indicios de adónde va. Esas enormes puertas a las que llega están guardadas por la Justicia. Para los griegos, la Justicia era una diosa que tenía que vigilar todo lo que sucedía en el mundo. Pero cuando llegaba el momento de decir dónde vive, la respuesta más clara de los poetas griegos era que «comparte la morada con los dioses del inframundo». Además, está el modo en que la diosa saluda a Parménides. Lo recibe «amablemente» —la palabra significa que lo acoge de manera «favorable», «amable», «cálida»— y le da la mano derecha. Nada era más importante que encontrar una bienvenida amable y favorable cuando uno descendía al mundo de los muertos. La alternativa era la aniquilación. Y allí, en el inframundo, la mano derecha indica aceptación, favor. La mano izquierda significa destrucción. Por este motivo los textos órficos se escribían sobre oro y eran enterrados con los iniciados en el sur de Italia, para recordarles cómo seguir por el camino derecho y asegurar que la reina de los muertos los recibía «amablemente». La palabra de los textos y la que emplea Parménides es la misma.

Aldous Huxley[19] dice que los anhelos, emociones e imaginaciones de los que se arrodillan y, durante generaciones, se han arrodillado ante el altar, crean, por así decirlo, un duradero vórtice (remolino) en el medio psíquico, de modo que la imagen vive con una secundaria, inferior vida divina, proyectada en ella por sus

[19] La filosofía perenne. Aldous Huxley

adoradores, además de la primaria vida divina que, en común con todos los demás seres animados e inanimados, posee en virtud de su relación con la Base divina. La experiencia religiosa de los sacramentistas y adoradores de imágenes puede ser perfectamente genuina y objetiva, pero no es siempre o necesariamente una experiencia de Dios o la Divinidad. Puede ser, y quizá en los más de los casos, realmente sea, una experiencia del campo de fuerza engendrado por las mentes de pasados y presentes adoradores y proyectada en el objeto sacramental, al que se adhiere, por así decirlo, en una condición que podría llamarse de objetividad de segunda mano, esperando ser percibida por espíritus adecuadamente afinados a ella. Basta decir aquí que el desdén del iconoclasta por los sacramentos y símbolos, por considerarlos mera mojiganga de palo y piedra, es completamente injustificado. El protestantismo satírico olvidó que Dios no está menos en el abrevadero que en la imagen convencionalmente sagrada. «Levanta la piedra y me encontrarás —afirma la más conocida de las Oxyrhynchus Logia de Jesús de Oxirrinco —, hiende la madera y allí estoy».

Mircea Eliade[20] tiene un capítulo dedicado al Cosmos y al Caos. Lo que caracteriza a las sociedades tradicionales es la oposición que tácitamente establecen entre su territorio habitado y el espacio desconocido e indeterminado que les circunda: el primero es el «Mundo» (con mayor precisión: «nuestro mundo»), el Cosmos; el resto ya no es un Cosmos, sino una especie de «otro mundo», un espacio extraño, caótico, poblado de larvas, de demonios, de «extranjeros» (asimilados, por lo demás, a demonios o a los

[20] *Lo sagrado y lo profano*. Mircea Eliade

fantasmas). A primera vista, esta ruptura en el espacio parece debida a la oposición entre un territorio habitado y organizado; por tanto, «cosmizado», y el espacio desconocido que se extiende allende sus fronteras: de un lado se tiene un «Cosmos», del otro, un «Caos». Pero se verá que, si todo territorio habitado es un Cosmos, lo es precisamente por haber sido consagrado previamente, por ser, de un modo u otro, obra de los dioses, o por comunicar con el mundo de estos. El «Mundo» (es decir, «nuestro mundo») es un universo en cuyo interior se ha manifestado ya lo sagrado y en el que, por consiguiente, se ha hecho posible y repetible la ruptura de niveles. Todo esto se desprende con meridiana claridad del ritual védico de toma de posesión de un territorio: la posesión adquiere validez legal por la erección de un altar del fuego consagrado a Agni: «Se dice que está instalado cuando se ha construido un altar de fuego (garha-patya), y todos los que construyen el altar de fuego quedan legalmente establecidos» (Çatapatha Brâhamana, VI, i, I, 1-4). Por la erección del altar del fuego, Agni se hace presente y la comunicación con el mundo de los dioses queda asegurada: el espacio del altar se convierte en un espacio sagrado. Con todo, la significación del ritual es mucho más compleja, y si se tienen en cuenta todas sus articulaciones, se comprende el por qué la consagración de un territorio equivale a su cosmización.

En efecto, la erección de un altar a Agni no es sino la reproducción, a escala microcósmica, de la Creación. El agua en la que se amasa la arcilla se asimila al Agua primordial; la arcilla que sirve de base al altar simboliza la Tierra; las paredes laterales representan la Atmósfera, etc. Y la construcción se acompaña de cánticos que proclaman explícitamente qué región cósmica se acaba de crear (Çatapatha Brâhamana, I, ix, 2, 29, etc.). En una palabra: la

erección de un altar del fuego, lo único que da validez a la toma de posesión de un territorio, equivale a una cosmogonía. Un territorio desconocido, extranjero, sin ocupar (lo que quiere decir con frecuencia: sin ocupar por «los nuestros»), continúa participando de la modalidad fluida y larvaria del «Caos». Al ocuparlo y, sobre todo, al instalarse en él, el hombre lo transforma simbólicamente en Cosmos por una repetición ritual de la cosmogonía. Lo que ha de convertirse en «nuestro mundo» tiene que haber sido «creado» previamente, y toda creación tiene un modelo ejemplar: la Creación del Universo por los dioses. Los colonos escandinavos, cuando tomaron posesión de Islandia (land-nâma) y la roturaron, no consideraban esta empresa ni como una obra original, ni como un trabajo humano y profano. Para ellos, su labor no era más que la repetición de un acto primordial: la transformación del Caos en Cosmos por el acto divino de la Creación.

Al trabajar la tierra desértica, repetían simplemente el acto de los dioses que habían organizado el Caos dándole una estructura, formas y normas. Trátese de roturar una tierra inculta o de conquistar y de ocupar un territorio ya habitado por «otros» seres humanos: la toma de posesión ritual debe en uno u otro caso repetir la cosmogonía. En la perspectiva de las sociedades arcaicas, todo lo que no es «nuestro mundo» no es todavía «mundo». No puede hacer uno «suyo» un territorio si no le crea de nuevo, es decir, si no le consagra. Este comportamiento religioso con respecto a las tierras desconocidas se prolongó, incluso en Occidente, hasta la aurora misma de los tiempos modernos. Los «conquistadores» españoles y portugueses tomaban posesión, en nombre de Jesucristo, de los territorios que habían descubierto y conquistado. La erección de la Cruz consagraba la comarca, equivalía, en cierto modo, a un «nuevo

nacimiento»: por Cristo, «las cosas viejas han pasado, he aquí que todas las cosas se han hecho nuevas» (II Corintios, 17). El país recién descubierto quedaba «renovado», «recreado» por la Cruz.

Eugen Drewermann interpreta la Biblia mediante la psicología profunda para revelar los anhelos y miedos del alma humana. Rechaza reducir los textos sagrados a simples datos históricos. En su lugar, ve los mitos y símbolos como un lenguaje invisible que expresa la verdad más íntima de la psique y la relación del hombre con Dios. El análisis clásico busca fechas y datos exactos, pero ignora el sentido existencial y emocional del texto. El peligro de la superficialidad: Tratar los relatos míticos como si fueran crónicas reales destruye su capacidad para sanar el espíritu humano. Valor literario y vital: La Biblia funciona como los sueños o los cuentos de hadas; usa símbolos que van directos al inconsciente. Lo Invisible aparece como la profundidad del alma. Lo invisible no es un lugar lejano, sino la capa más honda del alma donde residen las grandes preguntas. Aparecen los mitos de salvación como los relatos del Edén o la caída que NO hablan de un evento biológico pasado, sino de cómo el amor humano se rompe por el miedo y la culpa. El mensaje de Jesús se entiende como una terapia espiritual capaz de quitar el miedo y devolver la confianza al ser humano.

Pero a pesar de que el estudio de Drewermann prueba claramente la existencia de ese mundo oculto que se esconde en nosotros desde donde opera, nos movemos en una nebulosa de tal calibre que a la hora de pretender utilizarlo como instrumento de comprensión no nos sirve para mucho como puede demostrarse por los ejemplos concretos que él mismo aduce. Todo se reduce en el fondo a lo mismo: al problema de la angustia que ahoga a todo hombre y al ansia de armonía y libertad que brota de lo más hondo

de él. Por lo demás, no hay unanimidad en la interpretación de estos arquetipos que hacen que los problemas vitales de toda la humanidad, por muy distantes que los diversos pueblos se encuentren, se manifiesten literariamente de forma muy parecida. Drewermann explica bien las similitudes, pero se detiene poco en las divergencias que son más profundas de lo que él señala. Pienso que es un tópico muy generalizado el decir que todas las religiones coinciden en lo fundamental. La misma confesión cristiana, nacida del judaísmo, se diferencia tanto de él, que Jesucristo fue condenado a muerte por pensar los dirigentes judíos que sus afirmaciones destruían la esencia de esa religión. Hay más diferencias entre las religiones de las que presupone Drewermann, quien no explica bien estos procesos de individuación. En resumen, el psicoanálisis como los métodos histórico críticos, son imprescindibles para alcanzar el núcleo de la Escritura, pero no son suficientes.

Miguel de Unamuno[21] nos dice que el sentimiento de divinidad y de Dios, y la fe, la esperanza y la caridad en él fundadas, fundan a su vez la religión. De la fe en Dios nace la fe en los hombres, de la esperanza en Él la esperanza en estos, y de la caridad o piedad hacia Dios -pues como Cicerón, De natura deorum, libro 1, capítulo XII, dijo, est enim pietas iustitia adversum deos- (porque la piedad es justicia contra los dioses) la caridad para con los hombres. En Dios se cifra no ya sólo la Humanidad, sino el Universo todo, y éste espiritualizado e intimado ya que la fe cristiana dice que Dios acabará siendo todo en todos. Santa Teresa dijo, y con más áspero y desesperado sentido lo repitió Miguel de Molinos, que el alma debe hacerse cuenta que no hay sino ella y Dios. Y a la relación con Dios, a la unión más o menos

[21] *Del sentimiento trágico de la vida*. Miguel de Unamuno

íntima con Él, es a lo que llamamos religión. ¿Qué es la religión? ¿En qué se diferencia de la religiosidad y qué relaciones median entre ambas? Cada cual define la religión según la sienta en sí más aún que según en los demás la observe, ni cabe definirla sin de un modo o de otro sentirla. Decía Tácito (Hist., V, 4) hablando de los judíos, que era para estos profano todo lo que, para ellos, para los romanos, era sagrado, y a la contraria entre los judíos lo que para los romanos impuro. Y de aquí que llame él, el romano, a los judíos, gente sometida a la superstición y contraria a la religión y que, al fijarse en el cristianismo, que conocía muy mal y apenas si distinguía del judaísmo, lo reputa una perniciosa superstición. Así Tácito y así muchos con él. Pero ¿dónde acaba la religión y la superstición?, o tal vez: ¿dónde acaba esta para empezar aquella?, ¿cuál es el criterio para discernirlas? La religión, más que se define se describe, y más que se describe se siente.

Pero si alguna de esas definiciones alcanzó recientemente boga, ha sido la de Schleiermacher, de que es el *sencillo sentimiento de una relación de dependencia con algo superior a nosotros* y el deseo de entablar relaciones con esa misteriosa potencia. Ni está mal aquello de W. Hermann, de que el anhelo religioso del hombre es el deseo de la verdad de su existencia humana. Y «que, si hay un Dios, no se ha dejado sin indicársenos de algún modo, y quiere ser hallado por nosotros». Y para acabar con testimonios ajenos citaré el del ponderado y clarividente Cournot, al decir que «las manifestaciones religiosas son la consecuencia necesaria de la inclinación del hombre a creer en la existencia de un mundo invisible, sobrenatural y maravilloso, inclinación que ha podido mirarse, ya como reminiscencia de un estado anterior ya como el presentimiento de un destino futuro» (Traité de l'enchainement des idées

fondamentales dans les sciences et dans l'histoire, § 396). Y estamos ya en lo del destino futuro, la vida eterna, o sea la finalidad humana del Universo, o bien de Dios. A ella se llega por todos los caminos religiosos, pues que es *la esencia misma de toda religión*."

Aristóteles, el racionalista, -sigue diciendo Miguel de Unamuno- nos habla en su Ética de la superior felicidad de la vida contemplativa —βιος θεωρητικος—, y es corriente en los racionalistas todos poner la dicha en el conocimiento. Y la concepción de la felicidad eterna, del goce de Dios, como visión beatífica, como conocimiento y comprensión de Dios, es algo de origen racionalista, es la clase de felicidad que corresponde al Dios idea del aristotelismo. Pero es que para la felicidad se requiere, además de la visión, la delectación, y esta es muy poco racional y sólo se consigue sintiéndose uno distinto de Dios. Nuestro teólogo católico aristotélico, el que trató de racionalizar el sentimiento católico, santo Tomás de Aquino, nos dice en su Summa (primae, secundae partis, quaestio IV, art. l°) que «la delectación se requiere concomitante». Pero ¿qué delectación es la del que descansa? Descansar, *¿no es dormir y no tener siquiera conciencia de que se descansa?* «De la misma visión de Dios, se origina la delectación», añade el teólogo. Pero el alma, *¿se siente a sí misma como distinta de Dios?* «La delectación que acompaña a la operación del intelecto no impide esta, sino más bien la conforta», dice luego. ¡Claro está! Si no, *¿qué dicha es ésa?* Y para salvar la delectación, el deleite, el placer que tiene siempre, como el dolor, algo de material, y que no concebimos sino en un alma encarnada en cuerpo, hubo de imaginar que el alma bienaventurada esté unida a su cuerpo. Sin alguna especie de cuerpo, *¿cómo el deleite?* La inmortalidad del alma pura, sin alguna especie de cuerpo o periespíritu, no es inmortalidad verdadera. Y en el fondo, el anhelo

de prolongar esta vida, ésta y no otra, esta de carne y de dolor, ésta de que maldecimos a las veces tan sólo porque se acaba. Los más de los suicidas no se quitarían la vida si tuviesen la seguridad de no morirse nunca sobre la tierra. El que se mata, se mata por no esperar a morirse.

## 6.3. Mundos invisibles interiores (mística, muerte, conciencia)

Hemos hablado de Eugen Drewermann desde su– *Psicología profunda y exégesis bíblica-,* pero ¿nos hemos preguntado qué mundos invisibles narra este autor? La realidad es que los mundos invisibles de la Biblia son sentimientos trágicos de la vida como decía Unamuno que son las capas profundas del ser humano. Eugen Drewermann narra mundos invisibles que no son fantasías, sino las capas profundas —psíquicas, míticas, simbólicas— que sostienen la experiencia religiosa. Su proyecto entero consiste en mostrar que la Biblia habla, ante todo, del drama interior del ser humano: miedo, deseo, culpa, anhelo de sentido, búsqueda de liberación. Y que esos dramas se expresan en imágenes, relatos y figuras que no deben

leerse como crónicas históricas, sino como escenarios del alma. Su tesis central: el ser humano vive atrapado en un miedo ontológico —a la vulnerabilidad, al abandono, a la muerte— que las religiones intentan simbolizar y transformar. Miedo a la naturaleza donde fuerzas impersonales pueden destruirnos. Miedo a los otros que nos rechazan y excluyen con violencia. Miedo a uno mismo cuando sentimos la culpa, la autoacusación, la sensación de no ser digno. Miedo a Dios: cuando la imagen de Dios se deforma en figura castigadora. Este mundo invisible es el "subsuelo" de toda exégesis drewermanniana: cada relato bíblico es una dramatización del miedo y de su posible transfiguración.

Drewermann bebe de Jung, pero va más allá: para él, los símbolos bíblicos son estructuras psíquicas universales que narran procesos interiores. El desierto sería la soledad radical donde el yo se despoja de sus seguridades. El mar seria lo inconsciente, lo caótico, lo que amenaza con tragarnos. Una montaña sería el lugar de la visión, del encuentro con la verdad profunda. El éxodo, la salida del miedo hacia la libertad interior y la cruz: el punto donde el sufrimiento humano se vuelve revelación. Estos mundos no existen "fuera", sino en el interior del lector: la Biblia es un mapa de la psique. Drewermann interpreta personajes bíblicos como figuras de traumas humanos así Adán y Eva representarían la ruptura de la confianza originaria; Caín, expresaría la incapacidad de soportar la mirada del otro; Jonás, el miedo a la propia vocación; Pedro, la fragilidad del compromiso y Job sería el sufrimiento inocente que desestabiliza toda imagen de Dios. Cada personaje es un espejo de heridas que todos llevamos. También Drewermann intenta explicar el mundo de la culpa y la reconciliación, que no es un concepto moral sino un estado afectivo profundo: sentirse "fuera del amor". La Biblia

expresaría la nostalgia humana de totalidad donde prevalece el deseo de permanecer, el deseo de ser visto, de ser amado sin condiciones, el deseo de que el sufrimiento tenga un lugar en la historia del ser. Drewermann muestra que la fe no es adhesión doctrinal, sino respuesta a ese deseo profundo.

Quizá su aporte más radical se refiera a que Dios no es un ente exterior, sino la posibilidad de reconciliación interior. Dios es nuestra confianza, Dios que nos hace libres frente al miedo y nos permite vivir sin angustia. Este mundo invisible es el horizonte último de su lectura: la Biblia como camino hacia la integración del yo. Drewermann convierte la Biblia en una geografía del alma, donde cada relato es un viaje por mundos invisibles: miedo, trauma, símbolo, culpa, deseo, reconciliación. Su exégesis es una hermenéutica terapéutica que une psicología profunda, mitología y teología existencial. Pero también podríamos entender V.G. una montaña, con otros símbolos. Drewermann lo sabe y, de hecho, su método exige comparar los símbolos bíblicos con otros imaginarios culturales para descubrir su "núcleo psíquico". La montaña es un símbolo transreligioso, transhistórico y translingüístico. Lo bíblico es sólo una de sus modulaciones. En muchas culturas, la montaña es el punto donde el cielo toca la tierra. En Mesopotamia el zigurat imita una montaña artificial para permitir el ascenso hacia los dioses. En Grecia el Olimpo es la residencia de lo divino, inaccesible al humano ordinario. En la India el Meru es el centro del cosmos, alrededor del cual gira todo. Tíbet: el Kailash es la montaña sagrada donde se cruzan caminos espirituales. Aquí la montaña simboliza verticalidad ontológica: el ser humano que asciende busca un nivel de realidad más alto. La montaña podría ser un laboratorio del yo y quien sube se transforma. La literatura moderna en Hesse (El lobo estepario,

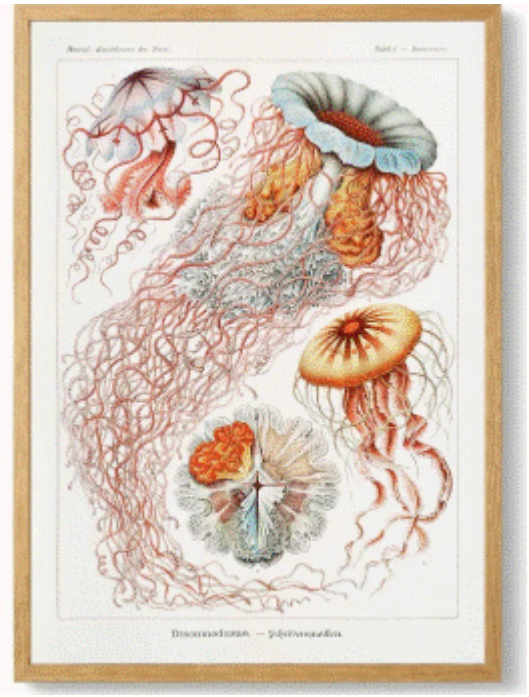
Siddhartha) la montaña es el lugar donde el yo se encuentra consigo mismo. La montaña es estructura del alma: altura, dificultad, perspectiva, aislamiento, revelación. En muchas narrativas míticas, la montaña es el lugar donde el héroe “muere simbólicamente” para renacer con una nueva identidad. Es un umbral.

La Biblia recoge estas capas universales y las reinterpreta, convirtiendo el Sinaí en lugar de revelación y alianza, el Carmelo en combate espiritual, el Tabor como lugar de la transfiguración. El Golgota la montaña donde la muerte se vuelve sentido. Drewermann diría que la montaña bíblica es una imagen del alma en ascenso hacia la confianza. Pero esa imagen sólo se entiende plenamente cuando se compara con otras tradiciones. La Biblia no nos enseña “otro” mundo invisible separado del nuestro; lo que hace es revelar la profundidad invisible de este mismo mundo y de nosotros como sus habitantes. Esa es, de hecho, la intuición central de Drewermann, pero también de Bultmann, Tillich, Ricoeur y la hermenéutica simbólica moderna. Para Drewermann cuando la Biblia habla de cielo, infierno, ángeles, demonios, gloria, caída, salvación, no está cartografiando un cosmos paralelo. Está nombrando estructuras de la existencia humana. El “cielo” indicaría la experiencia de sentido, confianza, apertura. El “Infierno” expresaría la vivencia de encierro, culpa, desesperación. Y así el ángel sería lo que nos llama a vivir, el demonio que nos paraliza y destruye o la salvación como liberación del miedo. Nada de esto es un mundo aparte: es nuestro mundo, visto desde su interior más profundo. Drewermann insiste en que los relatos bíblicos son escenarios del alma. No narran hechos externos, sino procesos internos.

Quizá el aporte más radical de Drewermann sea que Dios no es un ente exterior, sino la “posibilidad de reconciliación interior. Este

mundo invisible es el horizonte último de su lectura: la Biblia como camino hacia la integración del yo.

## 6.4. Los enigmas del universo de Haeckel



Las láminas hacen referencia directa a la famosa obra de 1899 *Los enigmas del universo* (*Die Welträtsel*) del zoólogo y filósofo alemán Ernst Haeckel. En este influyente libro, el naturalista defendió el monismo materialista y trató de explicar los grandes misterios de la vida a través de la ciencia y la evolución.

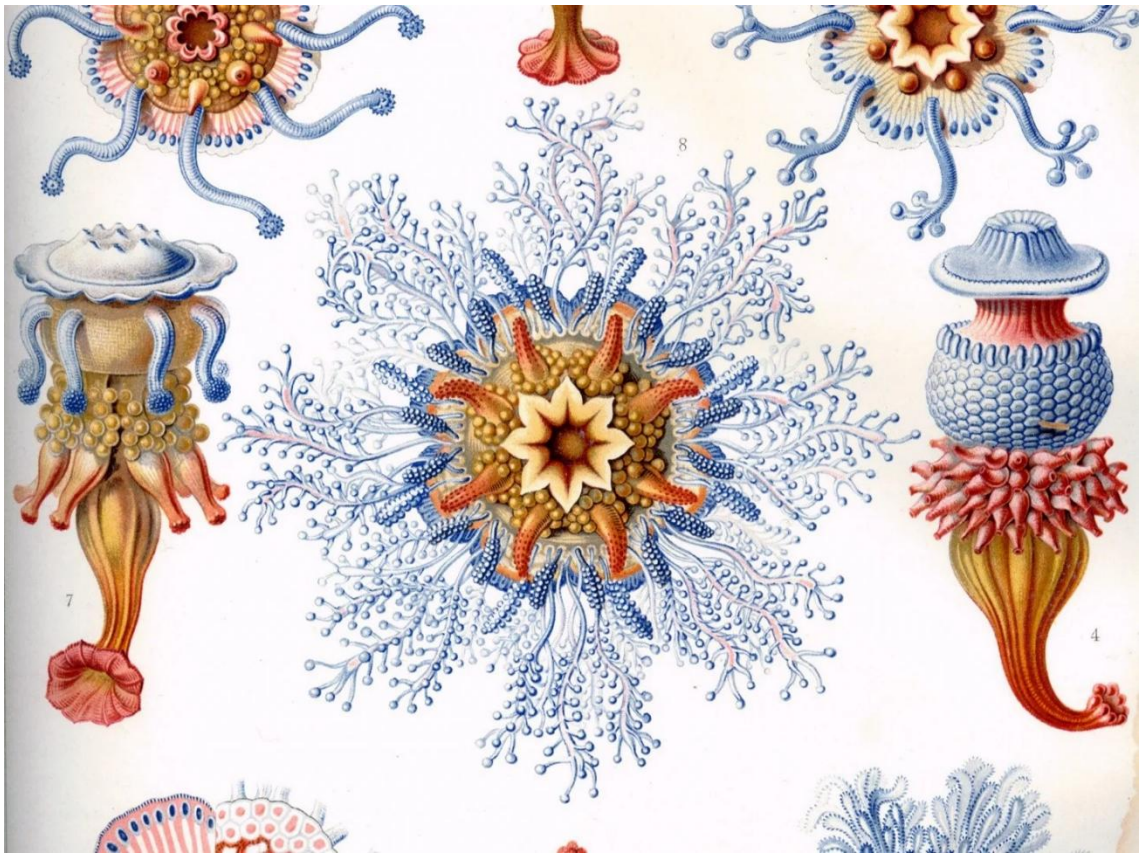
Haeckel fue el gran difusor de la teoría de la evolución en Alemania. Negó la separación entre materia y espíritu, viendo la naturaleza como una unidad y acuñó términos fundamentales como «ecología» y «filogenia». Su libro vendió decenas de miles de ejemplares y fascinó a pensadores de distintas corrientes. Popularizó la desacreditada teoría de la recapitulación («la ontogenia recapitula la filogenia») apoyándose en láminas idealizadas del desarrollo embrionario. Su fascinación por la simetría marina quedó plasmada en *Formas artísticas de la naturaleza*, influyendo de forma notable en el movimiento modernista (*Art Nouveau*). Ernst Haeckel no solo fue un biólogo y naturalista clave en la divulgación del darwinismo, sino también un hábil ilustrador que reveló a la ciencia y al público general un reino de vida microscópica y marina hasta entonces desconocido o ignorado. Su mayor contribución al mundo "invisible" fue el descubrimiento, clasificación e ilustración de miles de especies de “radiolarios” (protozoos unicelulares marinos). Haeckel demostró que estos organismos diminutos construyen esqueletos de sílice de una complejidad y simetría geométrica asombrosas, parecidos a esferas caladas, catedrales o encajes de cristal. También sacó a la luz los reinos y formas “protistas”[22]. En 1866, Haeckel propuso la creación de un tercer reino de la vida (además de Animales y Plantas) para agrupar a los organismos unicelulares que no encajaban en la visión tradicional, sentando las bases de la microbiología moderna. Describió y catalogó miles de especies de sifonóforos (medusas coloniales), medusas de profundidad, esponjas de mar y dinoflagelados capturados en expediciones científicas como la del

[22] Un protista es cualquier organismo eucariota (con un núcleo celular definido) que no es animal, planta ni hongo. Este grupo, conocido como el Reino Protista, incluye seres tan diversos como las algas unicelulares, los protozoos y los mohos mucilaginosos, abarcando tanto formas microscópicas como pluricelulares simples. Wikipedia

HMS Challenger. A través de su obra “Kunstformen der Natur” (“Formas artísticas de la naturaleza”, 1904), mostró que el mundo invisible obedecía a patrones matemáticos de simetría radiada, lo que influyó profundamente en el movimiento *Art Nouveau* y la arquitectura del siglo XX.

El libro "*El enigma del universo*" (originalmente titulado "Das Rätsel der Schöpfung", 1895) de Ernst Haeckel no es un texto científico sobre cosmología o física teórica, sino una obra filosófica y biológica que explora temas como la evolución, la unidad de la *naturaleza y el origen de la vida*. Sin embargo, Haeckel también fue un destacado *artista y ilustrador*, y en su época se le atribuyen ilustraciones icónicas, especialmente en su obra **"***Artísticas de la naturaleza"* (*"Kunstformen der Natur"*, 1899). Haeckel es famoso por sus *dibujos de radiolarios y algas*, que representan formas orgánicas complejas. Algunas de sus obras más conocidas son: *Radiolarios* (*"Kunstformen der Natur"*) que son microorganismos simétricos que parecen cristales biológicos. Estas ilustraciones fueron clave en la difusión de la teoría de la evolución. También ilustró vegetales y células para explicar la unidad biológica. Haeckel usaba dibujos para apoyar su idea de que *todos los seres vivos descienden de un*

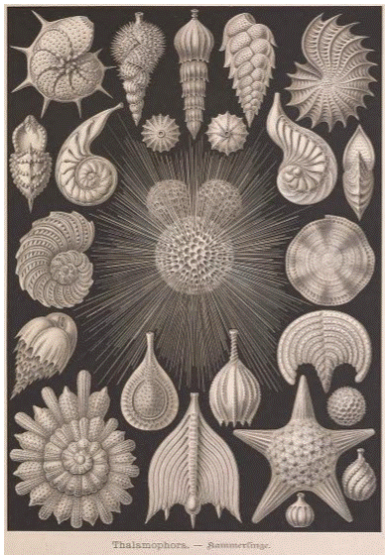
*ancestro común,* incluso los más simples. Sus ilustraciones de la "árbol de la vida" (un diagrama filogenético) combinaban con sus figuras de animales y plantas.

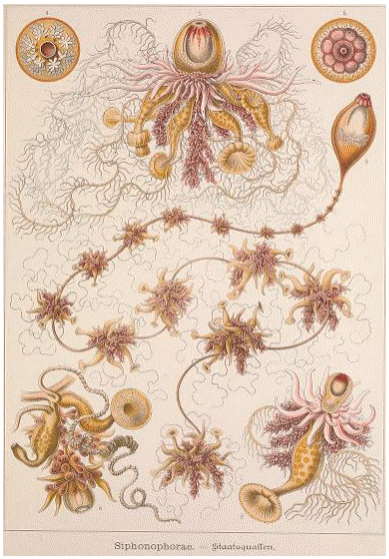



Aunque *El enigma del universo* no es un libro sobre astronomía, Haeckel exploraba ideas como el *origen de la vida y el universo*: En sus escritos, combinaba filosofía con ciencia para proponer que la vida surgió de procesos naturales, incluso si no tenía pruebas directas. Sus obras a veces incluían figuras abstractas o esbozos que representaban conceptos como el *cosmos ordenado* (inspirado en ideas de Darwin y Lamarck). *Esquemas de sistemas planetarios simplificados* (en sus textos sobre geología o cosmología). Sus ilustraciones han sido adaptadas y se reproducían en obras como *"Biología general"* (Haeckel) para explicar evolución. Libros de arte científico como *"Naturformen"* (1918), donde sus obras se exhiben junto a otras ilustraciones de la época.

**“**El enigma del universo” (Die Welträtsel, 1899) de Ernst Haeckel no es un libro ilustrado, a diferencia de sus obras más famosas (*Kunstformen der Natur*, *Die Radiolarien*, *Monographie der Medusen*, etc.). Por eso, cuando uno busca “ilustraciones del Enigma del universo”, los resultados suelen mezclar imágenes de otras obras de Haeckel. El libro es un tratado filosófico-científico, escrito como una defensa del *monismo*[23] y del evolucionismo darwinista. Es un texto discursivo, sin láminas ni figuras. Discute en *El enigma del universo* sore evolución, morfología, unidad de la vida, monismo, continuidad entre lo orgánico y lo inorgánico. Haeckel usa los radiolarios como ejemplo de formas geométricas naturales que parecen diseñadas, pero que él interpreta como producto de leyes físico-biológicas. Las medusas y sifonóforos son centrales en su trabajo zoológico. En *El enigma del universo* aparecen como ejemplos de organismos simples que muestran continuidad evolutiva. Las conchas, equinodermos y otros invertebrados ilustran la idea haeckeliana de unidad morfológica y de la evolución como despliegue de variaciones sobre patrones comunes. Aunque *El enigma del universo no incluye gráficos, Haeckel discute ampliamente la filogenia y la idea del “árbol de la vida*”. Estas láminas se han convertido en el icono visual del pensamiento de Haeckel, aunque son posteriores al libro. Representan su visión estética del monismo: la naturaleza como totalidad ordenada. *El enigma del universo* no incluye gráficos, Haeckel discute ampliamente la filogenia y la idea del “árbol de la vida”.

[23] El monismo es una doctrina filosófica que defiende que todo lo que existe se reduce a un único principio, sustancia o realidad fundamental, como la materia o el espíritu. Se contrapone directamente al dualismo (que separa mente y cuerpo) y al pluralismo.





Estas láminas se han convertido en el *icono visual* del pensamiento de Haeckel, aunque son posteriores al libro. Representan su visión estética del monismo: la naturaleza como totalidad ordenada.

¿Por qué *El enigma del universo* no tiene ilustraciones? Porque es un libro de filosofía científica, no de zoología ni de morfología. Su propósito es defender el *monismo* frente al dualismo religioso, presentar una *cosmología evolucionista*, discutir la relación entre *materia, espíritu y vida*, y responder a las “grandes preguntas” (origen del mundo, del alma, de la conciencia). Es, en cierto modo, el “manifiesto filosófico” de Haeckel. Haeckel trabajó con el microscopio de manera obsesiva, y lo que vio allí modeló su filosofía. Aunque *El enigma del universo* no incluya ilustraciones, el libro es, en el fondo, la traducción filosófica de lo que vio en el microscopio durante décadas. Si uno quiere entender el libro, tiene que mirar sus láminas zoológicas: ahí está la “metafísica” haeckeliana en estado visual. Lo que vio en el microscopio son tres intuiciones que le marcaron La primera se refiere a la geometría de la vida. Los radiolarios,

diatomeas, medusas y sifonóforos le revelaron formas matemáticas perfectas en organismos diminutos: simetrías radiales, estructuras fractales, patrones repetitivos. Pero para Haeckel, esto significaba que la vida no es caótica, y algo más, que la forma biológica obedece leyes físico-químicas, de modo que la naturaleza tiene una *racionalidad intrínseca*. Esto es el núcleo de su monismo: *la materia es suficiente para generar orden.* Otra de las intuiciones sería la continuidad entre *lo orgánico y lo inorgánico*. En el microscopio, Haeckel veía estructuras que parecían casi minerales: esqueletos silíceos, geometrías cristalinas, patrones regulares. Su conclusión era que no hay salto entre lo vivo y lo no vivo, la vida emerge de la materia sin intervención externa, la frontera entre "espíritu" y "materia" es ilusoria. La tercera intuición se refiere a la morfología de los seres vivos. Comparando embriones, larvas y adultos, Haeckel veía *variaciones sobre un mismo tema*: repeticiones, homologías, estructuras comunes y de ahí surge la idea del árbol filogenético. Esto es, la noción de que la evolución es un *despliegue de formas,* la convicción de que la vida es *una sola familia.*

Haeckel cree que la **belleza natural** es evidencia de orden cósmico. Las láminas de *Kunstformen der Natur* son, en realidad, *argumentos visuales* del monismo. *El enigma del universo, a*unque no estén en el libro, estas láminas son su **trasfondo visual**: **Radiolarios** como geometría natural, monismo material. **Medusas** como continuidad orgánica, transparencia de la vida. **Sifonóforos** como organismos coloniales, unidad en la multiplicidad. **Diatomeas** como arquitectura mineral de lo vivo. **Embriología** como genealogía de las formas, evolución y los **árboles filogenéticos** como unidad de la vida, genealogía universal. Haeckel es uno de los pocos científicos cuya metafísica nace de la observación microscópica. En él, la

biología se convierte en cosmología. Haeckel, Lynn Margulis, D'Arcy Thompson, incluso Bergson y Teilhard, todos los autores que mencionamos, trabajan en esa frontera: lo microscópico como revelación, lo invisible como fundamento, lo pequeño como origen de lo grande.

# 7. REVELANDO ESTRUCTURAS INVISIBLES DEL PASADO

Hasta hace aproximadamente cien años, todos nuestros hallazgos fueron accidentales. Los hombres que cavaban pozos o excavaban en cuevas en busca de fertilizante solían encontrar espadas, vasijas o puntas de flecha de piedra antiguas. También

hallaron extrañas piezas de piedra que no parecían formas naturales, pero tampoco se parecían a ninguna herramienta conocida. Por ello, quienes las encontraron les dieron nombres curiosos; por ejemplo, "rayos". Creían que estas extrañas piedras habían llegado a la Tierra como relámpagos. Ahora sabemos que estas piedras eran herramientas de piedra prehistóricas. La prehistoria se refiere al tiempo anterior al inicio de la historia escrita. De hecho, más del 99 por ciento de la historia del hombre es prehistoria. Tiene al menos medio millón de años, pero no empezó a escribir historia (ni a escribir nada) hasta hace unos 5.000 años. Los hombres que vivieron en tiempos prehistoricos no nos dejaron libros de historia, pero si dejaron involuntariamente un registro de su existencia, su presencia y su modo de vida. Este registro es estudiado e interpretado por diferentes tipos de científicos. Los científicos que estudian los huesos, los dientes y cualquier otra parte que encuentren de los cuerpos de los hombres prehistóricos se llaman antropólogos físicos. Los antropólogos físicos están capacitados, al igual que los médicos, para conocer a fondo el cuerpo humano. También estudian a personas vivas; saben más sobre los aspectos biológicos de las "razas" humanas que nadie. Si la policía encuentra un cuerpo en avanzado estado de descomposición en un maletero, le pide a un antropólogo físico que les diga cómo era la persona originalmente. Los antropólogos físicos que se especializan en hombres prehistóricos trabajan con fósiles, por lo que a veces se les llama paleontólogos humanos.

Existe un tipo de científico que estudia las cosas que los hombres prehistóricos crearon e hicieron. A este científico se le llama arqueólogo. Su labor consiste en buscar herramientas de piedra y metal, cerámica, tumbas y cuevas o chozas de los hombres que

vivieron antes de que comenzara la historia. Pero la arqueología es mucho más que simplemente buscar cosas. En palabras del profesor V. Gordon Childe, la arqueología "proporciona una especie de historia de la actividad humana, siempre y cuando las acciones hayan producido resultados concretos y dejado huellas materiales reconocibles". Los arqueólogos tienen que encontrar los rastros de cosas dejadas por el hombre antiguo, y es posible que solo se encuentren unos pocos objetos, ya que la mayoría de ellos probablemente eran demasiado blandos o demasiado frágiles para durar hasta el final. Sin embargo, el arqueólogo debe utilizar todo lo que encuentre para contar una historia -para crear una especie de historia- a partir de los objetos, los lugares donde se ha vivido y las tumbas que han escapado a la destrucción.

Lo que quiere decir Robert John Braidwood[24] es esto: imagina que estás caminando por un basurero y encuentras una bujía vieja y oxidada. Si te paras a pensar en qué significa la bujía, rápidamente recuerdas que es una parte del motor de un automóvil. Esto te dice algo sobre el hombre que tiró la bujía al basurero. O tenía un automóvil, o conocía o vivía cerca de alguien que lo tenía. No puede haber vivido hace mucho tiempo, recordarás, porque las bujías y los automóviles tienen apenas sesenta años. Cuando piensas en la vieja bujía de esta manera, estás dando los primeros pasos de lo que llamamos una interpretación arqueológica; estás haciendo que la bujía cuente una historia. Lo mismo ocurre con los objetos hechos por el hombre que los arqueólogos encontramos y colocamos en los museos. Por lo general, solo unos pocos de estos objetos son bonitos a la vista; pero cada uno de ellos tiene su historia. algún tipo de

[24] *Hombres prehistóricos*. Robert John Braidwood

historia que contar. La interpretación de sus hallazgos es la parte más importante del trabajo del arqueólogo. Es la forma en que se llega a comprender la "historia de la actividad humana" que se espera de la arqueología. Existen muchos otros científicos que ayudan al arqueólogo y al antropólogo físico a descubrir información sobre los hombres prehistóricos. Los geólogos nos ayudan a determinar la edad de las rocas, cuevas o depósitos de grava donde se encuentran huesos humanos u objetos fabricados por el hombre. Existen otros científicos cuyos nombres comienzan con "paleo" (la palabra griega para "antiguo"). Los paleontólogos estudian animales fósiles.

También existen, por ejemplo, científicos como los paleobotánicos y los paleoclimatólogos, que estudian plantas y climas antiguos. Estos científicos nos ayudan a conocer los tipos de animales y plantas que vivían en la prehistoria y que, por lo tanto, servían de alimento al hombre primitivo; cómo era el clima; y si había glaciares. Además, cuando les digo que los hombres prehistóricos no aparecieron hasta mucho después de la desaparición de los grandes dinosaurios, me baso en lo que afirman los paleontólogos. Ellos saben que los fósiles de hombres y de dinosaurios no se encuentran en el mismo período geológico. Los fósiles de dinosaurios aparecen en períodos tempranos, los fósiles de hombres mucho más tarde. Desde la Segunda Guerra Mundial, incluso los científicos atómicos han colaborado con los arqueólogos. Mediante el análisis de la cantidad de radiactividad presente en el carbón vegetal, la madera y otros materiales vegetales extraídos de yacimientos arqueológicos, han podido datar los sitios. También se han utilizado conchas e incluso cabellos de momias egipcias. Asimismo, se han descubierto fechas de eventos geológicos y climáticos.

## 7.1. El amanecer de todo

Una nueva historia de la humanidad se nos describe en “El amanecer de todo”[25] donde aparecen los antepasados más remotos como seres primitivos, ingenuos y violentos. El artículo de Eleanor Scerri en New Scientist (2018)[26] propone que el Homo sapiens surgió del multirregionalismo africano, desafiando la teoría de una única población ancestral. La investigación sostiene que diversas poblaciones interconectadas por cambios climáticos generaron una evolución en mosaico, demostrando que los humanos antiguos presentaban una mayor diversidad física que la actual. La ciencia actual desentierra "mundos invisibles" de la prehistoria que antes

[25] *The Dawn of Everything: A New History of Humanity*. 2021 David Graeber y David Wengrow

[26] Scerri en New Scientist, publicado online (25 de abril de 2018) como «*Origin of Our Species: Why Humans Were Once So Much More Diverse».*

eran imposibles de ver. A través del análisis molecular, la paleoclimatología y la tecnología digital, los científicos reconstruyen ecosistemas, microorganismos y comportamientos del pasado. El universo de lo microscópico e intangible, el ADN ambiental (eDNA), nos permite recuperar material genético disuelto en el sedimento de las cuevas sin necesidad de encontrar fósiles. Revela qué animales, plantas y neandertales pasaron por un lugar exacto. El estudio del sarro dental en esqueletos prehistóricos recupera bacterias y virus antiguos. Esto nos muestra las enfermedades invisibles que padecían y cómo era su salud bucal. El análisis de proteínas supervivientes en fragmentos óseos diminutos identifica especies animales imposibles de clasificar a simple vista. El estudio del polen fósil atrapado en el suelo reconstruye la vegetación exacta que rodeaba a los homínidos. Muestra cómo cambiaban los bosques y praderas con el clima. El análisis químico de los dientes prehistóricos revela la dieta exacta de un individuo y sus viajes geográficos durante su infancia y edad adulta.

Científicos estudian la resonancia dentro de las cuevas con arte rupestre. Descubrieron que las pinturas suelen estar en los puntos con mejor eco, sugiriendo rituales con cantos o música. Técnicas espectroscópicas detectan restos microscópicos de pigmentos orgánicos. Esto devuelve el color real a las herramientas, ropas y adornos prehistóricos que hoy vemos grises o marrones. En el libro de David Graeber & David Wengrow – *El amanecer de todo* se pueden ver esos mundos invisibles y donde se dedican a desenterrar un "mundo invisible" específico y fascinante que hoy nos abruma y que es el universo de la experimentación política y social de la prehistoria, un aspecto que la historia tradicional había borrado por completo. Mientras que la ciencia molecular hace visibles los

microbios o el clima del pasado, este libro hace visible la mente y la libertad de nuestros antepasados. Los "Mundos Invisibles" que revela el libro nos habla de ciudades sin reyes ni gobernantes: Los autores utilizan la arqueología moderna para mostrar "mega-sitios" prehistóricos de Ucrania o ciudades como Teotihuacán en México e Harappa en el valle del Indo. Demuestran que albergaban a miles de personas, pero no tenían palacios, templos de gobernantes ni señales de jerarquía rígida. Eran redes ciudadanas autogestionadas. Sociedades con "interruptor estacional": Revela comunidades prehistóricas que cambiaban su estructura según la época del año. En una estación se organizaban en tribus autoritarias para cazar en grupo, y en otra se dispersaban en bandas totalmente igualitarias y libres. Eran conscientes de la política y jugaban con ella deliberadamente. La trampa de la agricultura: Desmiente el mito de la "Revolución Neolítica" como un cambio repentino e irreversible.

El libro visibiliza un periodo intermedio de casi 3.000 años donde los humanos combinaban el cultivo a pequeña escala con la caza y la recolección, entrando y saliendo de la agricultura según les convenía. Hace visible un marco de valores que existía en la prehistoria y que hoy apenas podemos concebir, La libertad de moverse y ser recibido en cualquier otro lugar del mundo. La libertad de desobedecer órdenes directas. La libertad de reconfigurar la realidad social y crear sistemas políticos nuevos desde cero. Existe una conexión directa entre el artículo de Eleanor Scerri que mencionamos antes y la tesis de Graeber y Wengrow: “El texto de Scerri demuestra que los humanos antiguos eran físicamente y geográficamente más diversos de lo que creíamos. El libro de Graeber y Wengrow demuestra que esa diversidad no era solo física, sino también intelectual, cultural y política. La prehistoria no era un

grupo monótono de "cavernícolas" primitivos, sino un laboratorio gigante de ideas sociales. En el capítulo 2 de este libro de Graeber y Wengrow no habla de la prehistoria, sino del siglo XVII. Revela cómo los pensadores de las tribus americanas (como el jefe hurón Kondiaronk) viajaron a Europa o allí hablaron con misioneros franceses. El choque fue frontal. Los indígenas americanos quedaron horrorizados al ver que los europeos dejaban morir de hambre a sus pobres en las calles y que obedecían ciegamente a un rey. Las ideas occidentales de "libertad, igualdad y fraternidad" de la Ilustración no nacieron en Europa; fueron copiadas de las críticas intelectuales que estos pueblos indígenas hicieron a los colonizadores.

El libro muestra que los humanos del pasado eran políticamente mucho más listos que nosotros. Imagina una sociedad que cambia de gobierno según la estación del año. En verano, se organizaban con jefes estrictos y leyes rígidas para cazar en grupo. En invierno, derrocaban a esos jefes, se dividían en grupos pequeños y vivían en total libertad e igualdad. Sabían que el poder corrompe, así que lo usaban como un disfraz de temporada y luego lo tiraban. "Nos han vendido que la historia es una línea recta: pasamos de ser cazadores nómadas a inventar la agricultura, luego el Estado, y finalmente los atascos de tráfico y las hipotecas. El libro demuestra que esa línea recta es mentira. Durante miles de años, la gente cultivaba un año y al siguiente lo dejaba porque se aburría o porque surgía un jefe pesado. La agricultura no fue un "progreso", fue algo en lo que entramos y salimos hasta que nos quedamos atrapados.

El truco para cultivar y seguir siendo libre aparece en el Capítulo 6 (Granjas, ciudades y redes a escala global). Los jardines de Adonis donde tenemos que olvidar la idea de que la agricultura fue un trabajo esclavo desde el principio. Aquí vemos que las

primeras sociedades cultivaban plantas casi como un "juego" o un pasatiempo de temporada. Pasaban el resto del año cazando, de fiesta o viajando, demostrando que se puede conocer la agricultura sin dejar que esta te controle la vida. En el capítulo 5 buscan los autores el contraste entre los pueblos Yurok y los Kwakiutl. Es un choque cultural brutal entre dos vecinos de la costa pacífica de Norteamérica. Unos eran aristócratas, celebraban banquetes masivos llenos de derroche, tenían esclavos y acumulaban riqueza. Los otros, justo al lado, inventaron una cultura que odiaba el exceso, valoraba el ahorro extremo y consideraba de mala educación destacar. Dos sociedades que eligen ser polos opuestos solo para diferenciarse de sus vecinos. En el capítulo 8 (Ciudades imaginarias), aparece la ciudad de Teotihuacán (México). Hacia el año 300 d.C., esta enorme metrópolis empezó construyendo pirámides gigantes y haciendo sacrificios humanos (lo típico de un imperio sangriento). Pero a mitad de su historia, la gente se hartó. Destruyeron los monumentos, dejaron de construir palacios y utilizaron todos los recursos de la ciudad para hacer algo inaudito: construir barrios enteros de viviendas públicas cómodas e iguales para todos los ciudadanos. Pasaron de una dictadura a una utopía socialista urbana.

*Prehistoric Men* (de Robert J. Braidwood, publicado en 1948) es un manual de arqueología clásico y antiguo que defendía la postura tradicional: que la agricultura obligatoriamente trajo la propiedad privada y el Estado. Graeber y Wengrow escribieron *El amanecer de todo* justamente para demostrar lo contrario y rebatir las viejas teorías de libros como este donde aparece un párrafo donde se una esquizogénesis (en antropología y sociología, describe un proceso de diferenciación social progresiva y conflicto en cadena

entre grupos) entre «forrajeadores protestantes» y «reyes pescadores» Dicen los autores:

"Analicemos más en detalle aquello que podría describirse, en términos weberianos, como el espíritu de los forrajeadores del norte de California. En su origen se trata de una serie de imperativos éticos, en palabras de Goldschmidt, «la exigencia moral de trabajar y, por extensión, de la búsqueda de beneficios; la exigencia moral del autosacrificio; la individuación de la responsabilidad moral». Vinculada a esto había una pasión por la autonomía tan absoluta como la de cualquier bosquimano del Kalahari, incluso si tomaba una forma sorprendentemente distinta. Los hombres yurok evitaban escrupulosamente acabar en una situación de deuda o de obligación continuada hacia otra persona. Incluso la gestión colectiva de recursos se veía con recelo; los territorios de recolección se poseían de modo individual y se podían alquilar en épocas de escasez. La propiedad era sagrada, y no solo en el sentido de que se podía disparar a los cazadores furtivos. Tenía también un valor espiritual. Los hombres yurok[27] pasaban a menudo largas horas meditando acerca del dinero, mientras que los objetos de más valor −pieles preciosas y hojas de obsidiana, que solo se exhibían en festivales− eran los sacra definitivos. Los extranjeros se sorprendían ante lo puritano de los yurok también en el sentido literal: como informa Goldschmidt, a los hombres yurok más ambiciosos «se los exhortaba a abstenerse de todo tipo de placer: comida, gratificación sexual, juegos o pereza». Consideraban vulgares a las personas con mucho apetito. Daban lecciones a los jóvenes de ambos sexos sobre la

[27] Los yurok son un pueblo nativo americano que vive en el noroeste de California, Estados Unidos. Su nombre significa "gente del río abajo", y tradicionalmente han habitado las tierras cercanas al río Klamath y la costa del Pacífico

necesidad de comer poco a poco y con modestia, para mantener sus cuerpos delgados y ligeros.

Los yurok ricos se reunían todos los días en cabañas de sudación, en las que se daba un examen casi diario de todos estos valores, pues para acceder era necesario arrastrarse a través de una diminuta abertura por la que ningún cuerpo con sobrepeso podía pasar. Las comidas eran desabridas y espartanas; la decoración, sencilla; las danzas, modestas y controladas. No se heredaban rangos ni títulos. Incluso aquellos que heredaban riquezas seguían enfatizando su trabajo duro, su frugalidad y sus logros; y mientras que se esperaba de los ricos que fueran generosos con los menos afortunados y cuidaran de sus tierras y posesiones, las responsabilidades de compartir y cuidar de los demás eran menores en comparación con las de las sociedades forrajeadoras de casi cualquier otro lugar. *Las sociedades de la Costa Noroeste*, por el contrario, se hicieron famosas entre los observadores externos por su disposición a los *excesos*. Eran famosos entre los etnólogos europeos por los festivales potlatch, generalmente ofrecidos por aristócratas al acceder a algún nuevo título nobiliario (los nobles a menudo acumulaban varios de estos títulos a lo largo de su vida). En estos banquetes intentaban desplegar toda su grandeza y su desprecio por las posesiones mundanas mediante magníficas muestras de generosidad, abrumando a sus rivales con litros de aceite de eulacon, frutos del bosque y cantidades de pescado graso.

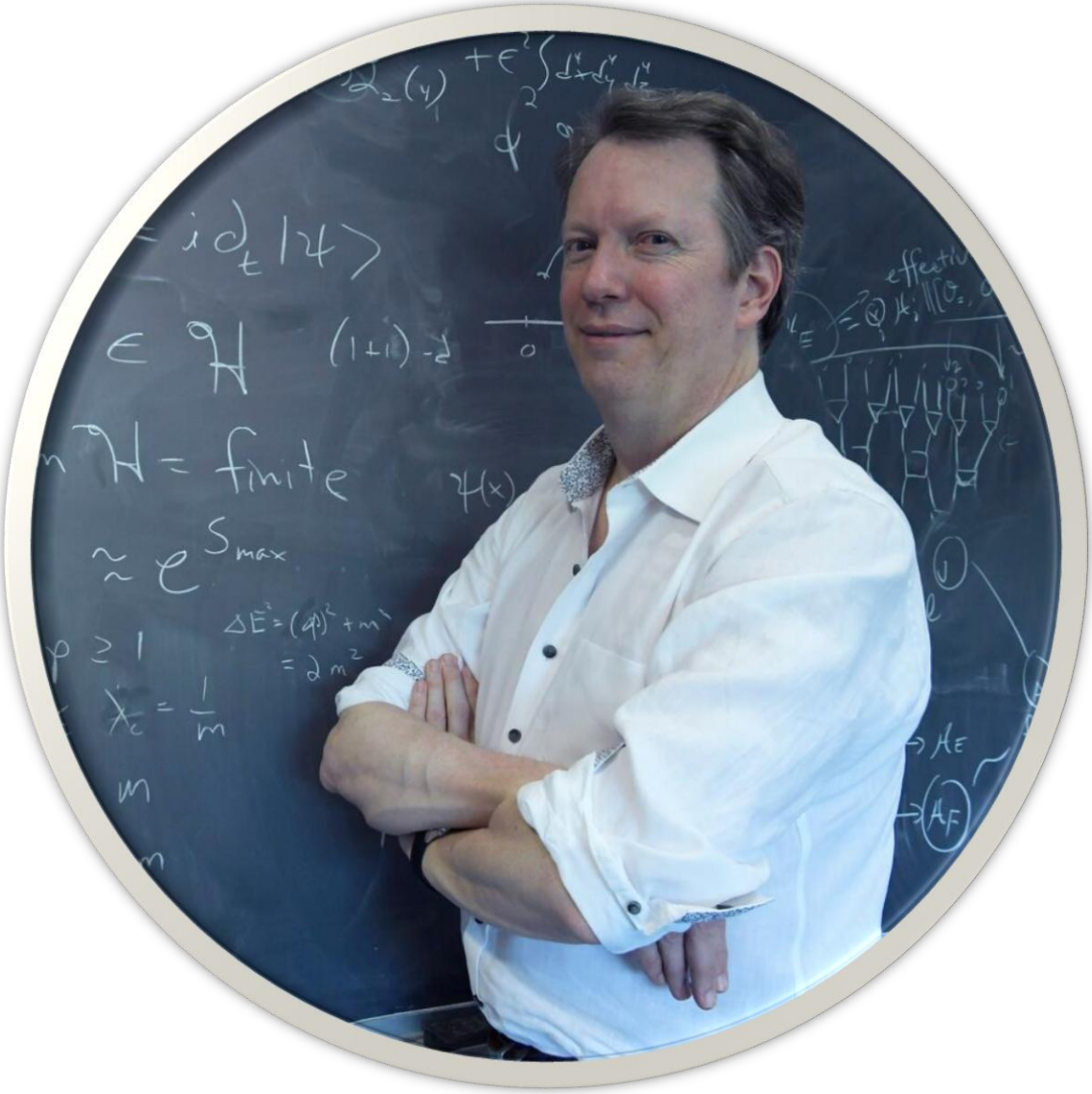
Estos banquetes eran escenarios de dramáticas competiciones que a veces acababan con la destrucción de tesoros familiares como escudos de cobre y otros tesoros, de igual modo que, durante el periodo de los primeros contactos con colonos, a principios del siglo XIX, culminaban con el sacrificio de esclavos. Cada tesoro era único;

no había nada parecido a dinero. El potlatch era una ocasión para la glotonería y la indulgencia; los «banquetes grasos» estaban pensados para dejar el cuerpo gordo y brillante. Los nobles a menudo se comparaban a sí mismos con montañas, y los regalos que daban, con rocas que caían por las laderas, que aplastaban y aplanaban a sus rivales. El grupo de la Costa Noroeste que mejor conocemos es el de los kwakwaka'wakw (kwakiutl), entre los que llevó a cabo trabajo de campo Boas. Se hicieron famosos por la ornamentación de su arte −su amor por las máscaras dentro de máscaras− y por los efectos especiales que empleaban en sus rituales y que incluían sangre falsa, trampillas y violentos policías−payasos. Todas las sociedades de alrededor −incluidos los nutca, los haida y los tsimshian− parecen haber compartido, a grandes rasgos, el mismo ethos: se hallaron culturas y representaciones materiales similarmente deslumbrantes desde Alaska hasta la zona del estado de Washington. También compartían la misma estructura social básica, con grupos hereditarios de nobleza, comunes y esclavos. A lo largo de toda la región, una franja de casi 2.500 kilómetros de tierra, del delta del río Copper al cabo Mendocino, los saqueos y ataques intergrupales para conseguir esclavos eran endémicos, y lo habían sido desde que se conservaba memoria.

En todas estas sociedades de la Costa Noroeste, tan solo los nobles disfrutaban de la prerrogativa ritual de comunicar con espíritus guardianes, que les confería acceso a títulos nobiliarios y el derecho a mantener los esclavos sometidos en los saqueos. Los comunes, entre ellos brillantes artistas y artesanos, eran en gran parte libres de decidir con qué casa nobiliaria preferían alinearse. Los jefes rivalizaban entre sí por su lealtad patrocinando banquetes, entretenimientos y participación vicaria en sus heroicas aventuras.

«Cuida bien de tu gente», era el consejo de un anciano a un joven jefe nuu−chah−nulth (nutca). «Si no gustas a tu gente, no eres nada» En muchos aspectos, el comportamiento de los aristócratas de la Costa Noroeste recuerda al de los “Don” (autoridad suprema) de la Mafia, con sus estrictos códigos de honor y sus relaciones de mecenazgo; o lo que los sociólogos denominan «la sociedad cortesana», el tipo de disposición que uno esperaría hallar en, por decir algo, la Sicilia feudal, de la que la Mafia extrajo muchos de sus códigos culturales. No obstante, esto es justo lo que se nos enseña que no debemos esperar hallar entre forrajeadores. Ciertamente, los seguidores de cualquiera de estos reyes pescadores nunca pasaban de las cien o doscientas personas, una cifra no muy mayor que la de cualquier aldea californiana; ni en la Costa Noroeste ni en el área cultural californiana había organizaciones políticas, económicas o religiosas mayores de ningún tipo. Pero dentro de las pequeñas comunidades existentes, se aplicaban principios de vida social totalmente diferentes.

## 7.2. El tiempo: Desde la eternidad hasta hoy




Sean Michael Carroll es un cosmólogo y profesor de física estadounidense especializado en energía oscura y relatividad general Este libro *"Desde la eternidad hasta hoy*" trata sobre la naturaleza del tiempo, el principio del universo y la estructura fundamental de la realidad física. Las cuestiones a las que nos enfrentamos para divulgar y comprender estas cuestiones son antiguas y venerables. ¿De dónde proceden el tiempo y el espacio?

¿El universo que vemos es todo lo que hay, o existen otros «universos» fuera del alcance de nuestras observaciones? ¿En qué se diferencia el futuro del pasado? Nuestras vidas transcurren en el tiempo, llevamos cuenta de él obsesivamente y luchamos contra él todos los días. Y aun así, sorprendentemente, pocos podrían ofrecer una explicación de lo que es realmente el tiempo. En la era de internet, podemos recurrir a Wikipedia para que nos oriente. Cuando escribo estas líneas, la entrada titulada «Tiempo» comienza así: “El tiempo es un componente de un sistema de medición que se utiliza para establecer la secuencia de los eventos, comparar las duraciones de los mismos y los intervalos existentes entre ellos, y para cuantificar el movimiento de los objetos. El tiempo ha sido un asunto de gran importancia para la religión, la filosofía y la ciencia, pero ni siquiera los mayores expertos han sido capaces de definir el tiempo de una manera que no resulte controvertida y a la vez sea de aplicación en todas las disciplinas en las que se utiliza.

Cuando Hermann Minkowski sugirió en 1907 que la mejor forma de concebir la relatividad especial era en términos de un espacio-tiempo unificado de cuatro dimensiones, Einstein se mostró escéptico. Se lamentó en una publicación de que la perspectiva de Minkowski «planteara grandes exigencias al lector en sus aspectos matemáticos». Pero Einstein no tardó en apreciar el formalismo espacio-temporal, en especial al volver su atención hacia la cuestión de cómo integrar la gravitación en la relatividad. Finalmente, adquirió el convencimiento de que la podía entenderse la gravedad como una manifestación de la curvatura del propio espacio-tiempo. Es una visión que aporta una nueva percepción extraordinaria, pero no puede valer como teoría científica si no se traduce en un conjunto apropiado de ecuaciones. Tales ecuaciones iban a venir de la

geometría, en particular de la geometría de Riemann, que permite que los espacios se curven arbitrariamente y se estudien desde dentro, en lugar de exigirles que encajen en un espacio de mayor dimensionalidad. El problema era que Einstein no sabía nada acerca de la geometría de Riemann, al igual que casi ningún físico de la época. Era una cuestión tan solo iniciada en la década de 1850, y entrada la década de 1910 no había suscitado ninguna atención especial. Y siempre se cumple que *lo que vemos no es todo lo que hay* y viceversa.

El misterio de la flecha del tiempo se resume en lo siguiente: ¿por qué eran tan particulares las condiciones en los inicios del universo, con una configuración de baja entropía[28] que hizo posibles los procesos interesantes e irreversibles que estaban por venir? Esa es la cuestión que este libro se propone abordar. Por desgracia, nadie sabe aún cuál es la respuesta correcta, pero hemos llegado a un punto en el desarrollo de la ciencia moderna en que disponemos de las herramientas para abordar con seriedad el asunto. Desde siempre, los científicos y los pensadores precientíficos han tratado de entender el tiempo. En la antigua Grecia, los filósofos presocráticos Heráclito y Parménides defendieron distintas posturas sobre la naturaleza del tiempo. En *Las ideas fundamentales del Universo: Espacio, tiempo y movimiento*, el físico Sean Carroll explica las leyes de la física clásica y la relatividad general de Einstein. La clave del libro enfrenta la física clásica y **e**xplora el marco de Isaac Newton sobre cómo se mueven los objetos. Une el espacio y el tiempo en una sola estructura geométrica. Explica la gravedad como la curvatura del espacio-tiempo provocada por la masa y la energía.

[28] La entropía es una magnitud física que mide el grado de desorden molecular o la dispersión de la energía en un sistema.

Describe los límites extremos donde el espacio y el tiempo se deforman por completo. Enseña a leer las fórmulas matemáticas como herramientas lógicas y bellas en lugar de evitarlas

Sean Carroll aborda los misterios del universo eliminando la barrera matemática y enfocándose en la filosofía de la física. Para él, lo que no vemos es lo que realmente da forma a todo lo que existe. Los grandes "misterios invisibles" del Universo explicados por Carroll bajo su visión divulgativa se refieren al tejido del espacio-tiempo diciendo que esto no es un vacío o la nada. Es una estructura elástica y dinámica. Se estira, se curva y se ondula, donde la gravedad no es una fuerza magnética invisible, sino que es simplemente la geometría de este tejido curvándose. Por otra parte, el misterio de la flecha del tiempo nos indica que las leyes de la física funcionan igual hacia adelante que hacia atrás. El tiempo solo corre en una dirección en la vida real. Esto se debe al orden extremo del Big Bang. El universo avanza inevitablemente hacia el desorden (entropía). El tiempo es la medida de ese desgaste invisible.

Los Campos Invisibles, las partículas (como los electrones) no son canicas sólidas. Son pequeñas vibraciones de campos invisibles que llenan todo el espacio. El universo es un océano de campos superpuestos. Lo que llamamos "materia" es solo espuma en la superficie de esos campos. Carroll es un firme defensor de la teoría de los "Muchos Mundos", mundos paralelos en una realidad cuántica. El universo cuántico no elige una sola opción al azar. Al tomar una decisión a nivel cuántico, la realidad se divide. Existen infinitas versiones invisibles del universo ocurriendo en paralelo. También Carroll nos habla de energía oscura y materia oscura diciéndonos que el 95% del cosmos está hecho de cosas que no interactúan con la luz. La materia oscura actúa como un pegamento invisible para las

galaxias. La energía oscura actúa como una presión invisible que acelera el universo. Vivimos flotando en un océano cósmico del que ignoramos casi todo. Sin embargo, hay reglas lógicas para crear tramas sólidas sin caer en la magia o en clichés trillados. Para Carroll, el tiempo no es un río que fluye porque sí; es una consecuencia del desorden. El universo comenzó en el Big Bang con un orden perfecto (baja entropía). Imagina un rompecabezas nuevo dentro de su caja. El tiempo solo avanza hacia el desorden (alta entropía). Si agitas la caja, las piezas se desordenan. Nunca se van a ordenar solas por mucho que sigas agitando. El pasado es diferente del futuro solo porque el pasado estaba más ordenado. Tu memoria funciona porque deja un rastro físico de desorden en tu cerebro al almacenar datos. Si un personaje intentara viajar al pasado, no solo cambiaría la historia; tendría que "ordenar" el universo a nivel atómico, lo que requeriría una cantidad de energía descomunal o destruiría la lógica de su propio cerebro (que necesita generar desorden para pensar).

A diferencia de las películas donde el multiverso es un grupo de dimensiones separadas a las que viajas, Carroll explica la teoría de "Muchos Mundos" como algo mucho más sutil y perturbador. Los universos paralelos no están "lejos", están justo aquí, superpuestos en el mismo espacio, pero incapaces de verse. Cada vez que una partícula cuántica se enfrenta a una bifurcación (ir a la izquierda o a la derecha) y interactúa con el entorno, el universo entero se divide en dos ramas. Si un aparato científico mide esa partícula, el científico (y todo su planeta) se duplica instantáneamente. Hay una versión que ve la izquierda y otra la derecha. Millones de divisiones ocurren cada segundo. Existen trillones de versiones tuyas ahora mismo, viviendo vidas ligeramente distintas o idénticas en ramas paralelas que jamás podrán comunicarse entre sí. En lugar de viajar físicamente a otro

universo, tu trama podría explorar qué pasa si alguien encuentra una forma de "escuchar el eco" o "sentir la interferencia" de una decisión tomada en una rama cuántica muy cercana. Para construir un sistema de viaje en el tiempo basado en la entropía y fiel a la visión de Sean Carroll, debemoss olvidar los portales mágicos o los coches veloces. En la física real, el tiempo es la dirección en la que el desorden aumenta. Viajar al pasado significa, literalmente, obligar a una parte del universo a ordenarse a la fuerza. No puedes disminuir la entropía (el desorden) de un objeto (rejuvenecerlo o enviarlo al pasado) sin aumentar drásticamente la entropía de su entorno. Para retrasar el reloj de una manzana y devolverla a su estado fresco, tu máquina debe generar una cantidad de calor y caos brutal a su alrededor. El "combustible" del viaje temporal no es el uranio, es el orden. Tu máquina necesita consumir soles enteros o fuentes de energía cósmica pura para "pagar el precio" de ordenar unos pocos átomos en el pasado. El límite de la Memoria Cósmica, esto es, la memoria y los recuerdos son estructuras de desorden dentro del cerebro. Si la máquina hace retroceder en el tiempo el cuerpo físico del viajero, también ordenará las conexiones neuronales de su cerebro, borrando sus recuerdos del futuro. Para viajar al pasado y recordar el futuro, el viajero necesita un "escudo de entropía aislada". Su cerebro debe permanecer en alta entropía (el presente) mientras su entorno físico retrocede a baja entropía (el pasado). Si el escudo falla, el viajero olvida por qué viajó.

Dos sistemas con diferentes niveles de entropía tienden a equilibrarse inmediatamente al tocarse (como el café caliente y la leche fría). Un objeto del futuro (alta entropía) que aparece en el pasado (baja entropía) es una anomalía termodinámica. El aire del pasado intentará "absorber" la energía del viajero. El viajero podría

sufrir una combustión espontánea o congelar todo a su alrededor al intentar equilibrar el choque térmico y atómico entre dos épocas distintas. A diferencia de la máquina de H.G. Wells, un dispositivo entrópico se describiría de una forma mucho más visceral y científica. La máquina no desaparece. El viajero se sienta dentro de una cámara de aislamiento. Al encenderse, la máquina empieza a absorber el desorden del interior. Para alguien que mira desde el exterior en el presente, el viajero no se esfuma; empieza a moverse al revés, a rejuvenecer y, finalmente, la cámara se vacía porque la materia vuelve al lugar exacto donde estaba hace años. El exterior de la máquina se vuelve un infierno de calor, radiación y caos físico. Viajar al pasado en una habitación puede destruir la manzana entera debido al desorden expulsado. La física del universo es fascinante, pero nuestro cerebro no está evolutivamente diseñado para procesar el tejido del espacio-tiempo o la entropía de golpe; es completamente normal (y muy sano) necesitar tiempo para digerirlo. Digerir que tiempo es desorden. Viajar al pasado es obligar al universo a ordenarse. Que ell coste de "comprar" orden en el pasado es generar un caos térmico y destructor en el presente. El borrado de memoria significaría que si el escudo entrópico falla, el cerebro del viajero se ordena y olvida el futuro. El efecto "leche con café" donde el pasado intentará absorber la entropía del viajero, provocando anomalías térmicas extremas a su alrededor.

Por último, otro libro de Sean Carroll es “*La partícula al final del universo. Del bosón de Higgs al umbral de un nuevo mundo*. Resumido este libro es la crónica de cómo la humanidad descubrió una pieza invisible que sostiene la estructura del universo, y de cómo ese hallazgo nos abre la puerta a nuevas preguntas sobre la realidad. Su descubrimiento en 2012 cambió la forma en que pensamos la

realidad física. Carroll cuenta la historia del bosón de Higgs como si fuera una aventura intelectual: una búsqueda de décadas para encontrar una pieza faltante del rompecabezas que explica por qué las cosas tienen masa y cómo funciona el tejido fundamental del universo. Nos encontramos en este libro con la historia de la física moderna, relatos de los científicos y reflexiones sobre lo que este descubrimiento significa para el futuro de la ciencia. Carroll empieza con una pregunta aparentemente simple: ¿Por qué las partículas tienen masa? ¿por qué existe lo “pesado”? Nos explica que sin masa no habría átomos, química, estrellas o vida. El Modelo Estándar describía muy bien las fuerzas y partículas… pero no explicaba el origen de la masa. Era como tener un mapa del mundo sin saber por qué hay montañas. El campo de Higgs aparece como la solución: un campo invisible que llena todo el espacio y que “frena” a las partículas, dándoles masa. El bosón de Higgs es la manifestación detectable de ese campo. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) sería la catedral científica del siglo XXI a la que Carrol dedica parte a explicar. Este Colisionador sería un túnel circular de 27 km, miles de imanes superconductores,temperaturas más frías que el espacio, y energías que recrean condiciones del universo primitivo.

Lo presenta como una obra colectiva de la humanidad, comparable a las catedrales medievales: gigantesca, costosa, y construida para explorar lo invisible. Durante décadas, el Higgs fue una hipótesis elegante pero indemostrada. Carroll narra las dudas, los intentos fallidos, los aceleradores previos, las rivalidades científicas, y la presión por encontrar “la partícula”. El 4 de julio de 2012, los experimentos ATLAS y CMS anunciaron la detección de una nueva partícula compatible con el Higgs. Carroll describe ese día como un momento de celebración global: la confirmación de una

teoría que llevaba casi medio siglo esperando. ¿Y ahora qué? El Higgs como puerta a nuevos mundos. Carroll explica que el Higgs no cierra la física, sino que abre preguntas más profundas: ¿Qué es la materia oscura? ¿Por qué el Higgs tiene la masa que tiene? ¿Existen múltiples campos de Higgs? ¿Hay dimensiones ocultas? ¿Cómo encaja todo esto con la gravedad cuántica? El Higgs es un umbral, no un final: una pista de que el universo es más extraño y más rico de lo que imaginábamos. El estilo de Carroll con claridad, humor y filosofía, reflexiona sobre el sentido de investigar lo invisible. Esto de investigar lo invisible, es especialmente útil insistir porque lo fundamental del universo es invisible, y la ciencia moderna es una exploración de esos mundos ocultos.

## 7.3. Los agujeros negros

Stephen Hawking ha sido capaz de logros excepcionales trabajando con unas limitaciones extraordinarias, y la razón es muy sencilla: se niega a ceder en ningún sentido. No va a limitar su calendario de viajes, ni a comer en el restaurante equivocado, ni a beber un té de peor calidad, ni a reprimir su retorcido sentido del humor, ni a reflexionar de una manera menos ambiciosa sobre los entresijos del universo, simplemente porque esté postrado en una silla de ruedas. Y esta fuerza de carácter lo impulsa en el plano científico y también en su vida. En 1973, Hawking estaba molesto. Jacob Bekenstein, un joven estudiante de doctorado de Princeton, había escrito un artículo en el que proponía algo disparatado: que los agujeros negros contenían enormes cantidades de entropía. Por

aquel entonces, Hawking era el máximo experto mundial en agujeros negros y (según sus propias palabras) estaba disgustado con Bekenstein, porque pensaba que había utilizado incorrectamente algunos de sus resultados anteriores. Así que se propuso demostrar hasta qué punto era disparatada la idea de Bekenstein; para empezar, se podía demostrar que, si los agujeros negros tuviesen entropía, deberían emitir radiación, y todo el mundo sabe que los agujeros negros son negros. Al final, como es sabido, Hawking acabó sorprendiendo a todo el mundo, incluido él mismo. Los agujeros negros sí que poseen entropía, y de hecho emiten radiación, si se tienen en cuenta las delicadas consecuencias de la mecánica cuántica. Por muy obstinados que seamos, las reglas de la naturaleza no se amoldarán a nuestra voluntad, y Hawking era lo suficientemente inteligente como para aceptar las radicales consecuencias de su descubrimiento. Acabó proporcionando a los físicos el indicio más importante sobre la interacción entre mecánica cuántica y gravedad, y enseñándonos una profunda lección sobre la naturaleza de la entropía.

Dice Hawking que tenemos motivos de mucho peso para creer que los agujeros negros existen en el mundo real. Obviamente, no podemos verlos directamente (aunque Hawking demostró que no son completamente negros, siguen siendo bastante oscuros), pero podemos observar lo que les sucede a las cosas que los rodean, y el entorno de un agujero negro es suficientemente especial para que muchas veces podamos estar seguros de haber encontrado uno. Algunos agujeros negros se forman a partir del colapso de estrellas muy masivas, y con frecuencia cuentan con estrellas que orbitan a su alrededor. Gas procedente de la estrella puede caer hacia el agujero negro, formando un disco de acreción que alcanza

temperaturas muy elevadas y emite grandes cantidades de radiación de rayos X. Los observatorios instalados en satélites han descubierto una serie de fuentes de rayos X que exhiben todas las propiedades que cabría esperar en un objeto de este tipo; en particular, una gran cantidad de radiación de alta intensidad procedente de una región muy pequeña del espacio. Los astrofísicos no tienen otra explicación razonable para estas observaciones más que los agujeros negros.

También hay pruebas de la existencia de agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias, agujeros negros cuya masa es más de un millón de veces superior a la del Sol. (Lo cual es solo una minúscula porción de la masa total de una galaxia, que suele ser del orden de cien mil millones de veces la masa del Sol.) En las primeras fases de la formación de una galaxia, estos gigantescos agujeros negros engullen la materia que los rodea en un violento torbellino, visible para nosotros en forma de cuásares. Una vez que la galaxia se ha estabilizado un poco, las cosas se tranquilizan y los cuásares «se apagan». Estamos bastante seguros de que en la propia Vía Láctea se oculta un agujero negro equivalente a unos cuatro millones de masas solares. Incluso sin los destellos de radiación propios de los cuásares, las observaciones de las estrellas en el centro de la galaxia revelan que orbitan en cerradas elipses alrededor de un objeto invisible. Si la relatividad general tiene algo que decir en el asunto, podemos deducir que estas estrellas deben de estar atrapadas en el campo gravitatorio de algo tan denso y tan masivo que no puede ser más que un agujero negro.

Aparte del grupo de Wheeler en Princeton, el mejor trabajo sobre relatividad general a principios de la década de 1970 estaba siendo llevado a cabo en Gran Bretaña. En particular, Stephen Hawking y Roger Penrose estaban inventando y aplicando nuevas

técnicas matemáticas para el estudio del espacio-tiempo curvo. De sus investigaciones surgieron los célebres teoremas sobre singularidades (cuando la gravedad es lo suficientemente intensa, como en los agujeros negros o cerca del big bang, la relatividad general predice necesariamente la existencia de singularidades), así como el resultado de Hawking según el cual el área del horizonte de sucesos de un agujero negro nunca disminuiría. Hawking prestaba mucha atención al trabajo de Bekenstein, pero no le convencía demasiado. Para empezar, si uno va a tomarse en serio la analogía entre el área y la entropía, debería tomarse igualmente en serio los demás componentes de la analogía entre la termodinámica y la mecánica de los agujeros negros. En particular, la gravedad superficial de un agujero negro (que es grande para agujeros negros pequeños y con carga y espín despreciables, y más pequeña para agujeros negros grandes con carga y espín significativos) debería ser proporcional a su temperatura. Pero, a primera vista, eso parecería absurdo. Cuando calentamos algo a temperaturas elevadas brilla, como el metal fundido o una llama. Pero los agujeros negros no brillan: son negros. «¿Y ahora qué?», podemos imaginar que pensaba Hawking en el otro lado del Atlántico.

Como viajero inveterado que es, Hawking visitó la Unión Soviética en 1973 para hablar sobre los agujeros negros. Bajo la dirección de Yákov Zeldóvich, Moscú contaba con un grupo de expertos en relatividad y cosmología a la altura de los de Princeton o Cambridge. Zeldóvich y su colega Alexander Starobinski le hablaron a Hawking de su trabajo para entender el proceso de Penrose —para extraer energía de un agujero negro giratorio— Sin embargo, por muy divertido que sea buscar agujeros negros reales en el universo, lo es aún más sentarse a reflexionar sobre ellos. Los agujeros negros son

el mejor laboratorio de experimentos mentales posible para quien esté interesado en la gravedad. Y lo que los hace tan especiales es su pureza. Aunque las observaciones nos convencen de que los agujeros negros existen, no nos proporcionan mucha información detallada sobre sus propiedades; no podemos acercarnos a un agujero negro y explorarlo. Así pues, cuando hacemos afirmaciones contundentes sobre tal o cual propiedad de los agujeros negros, siempre hablamos implícitamente dentro de algún marco teórico. Por desgracia, los científicos aún no entienden del todo la gravedad cuántica, la supuesta conciliación definitiva de la relatividad general con los principios de la mecánica cuántica. Por lo tanto, no tenemos una única teoría correcta dentro de la cual dar respuesta a nuestras preguntas, por lo que a menudo investigamos estas cuestiones en el contexto de uno de estos tres marcos teóricos clásicos: La Relatividad general clásica, tal y como la dejó por escrito Einstein. La Mecánica cuántica en un espacio-tiempo curvo y por último la Gravedad cuántica.

En relatividad general clásica, un agujero negro es el tipo más puro de campo gravitatorio que puede haber. En el mundo flexible de los experimentos mentales, podemos imaginar que creamos un agujero negro de varias maneras: a partir de una bola de gas, como una estrella ordinaria, o de un enorme planeta hecho de oro puro, o de una gigantesca esfera de helado. Pero, una vez que estas cosas colapsan hasta el punto de que su campo gravitatorio es tan intenso que nada puede escapar —una vez que son oficialmente agujeros negros—, cualquier indicio del tipo de sustancia del que estaban hechas desaparece por completo. Un agujero negro creado a partir de una bola de gas con la masa del Sol es indistinguible de un agujero negro hecho de una bola de helado de la masa del Sol. El agujero

negro no es simplemente, según la relatividad general, una versión condensada de la sustancia inicial. Es puro campo gravitatorio; la «sustancia» original ha desaparecido en la singularidad, y lo que queda es una región donde el espacio-tiempo es fuertemente curvo.

Cuando consideramos el campo gravitatorio de la Tierra, podemos empezar modelando nuestro planeta como una esfera perfecta de una cierta masa y un cierto tamaño. Pero, claramente, eso es tan solo una aproximación. Si queremos hacer algo un poco mejor, tendremos en cuenta el hecho de que la Tierra también rota sobre su eje, por lo que es ligeramente más ancha cerca del ecuador que en los polos. Y, si queremos ser muy meticulosos, el valor exacto del campo gravitatorio terrestre varía de manera compleja de un punto a otro: variaciones en la altitud de la superficie, así como cambios en la densidad entre la tierra y el mar, o entre distintos tipos de roca, dan lugar a variaciones pequeñas pero medibles en la gravedad terrestre. De hecho, todas las propiedades locales del campo gravitatorio terrestre contienen bastante información. Los agujeros negros no son así. Una vez que se forman, desaparece cualquier anomalía o variación en la sustancia a partir de la cual se crearon. Puede que haya un breve período, justo durante la formación, en que el agujero negro aún no sea estable, pero enseguida se vuelve uniforme e indiferenciado. Una vez que alcanza la estabilidad, hay tres cosas que se pueden medir de un agujero negro: su masa total, la velocidad a la que gira y cuánta carga eléctrica posee. (Los agujeros negros astrofísicos reales normalmente poseen una carga próxima a cero, pero giran a gran velocidad.) Y eso es todo. Dos cúmulos de sustancia con la misma masa, carga y velocidad de giro, una vez convertidos en agujeros negros, serán, desde el punto de vista de la relatividad general

clásica, completamente indistinguibles. Esta interesante predicción de la relatividad general la resume una ingeniosa expresión acuñada por John Wheeler, aquel que les dio a los agujeros negros su nombre: «Los agujeros negros no tienen pelo».

# 8. MUNDOS INVISIBLES QUE SOSTIENEN LO VISIBLE

Sean Carroll es un renombrado físico y filósofo que trabaja en la Universidad Johns Hopkins. Obtuvo su doctorado en Harvard en 1993 y es conocido por su investigación en el espacio-tiempo, la mecánica cuántica, la complejidad y la emergencia. Su aclamado libro, “La partícula al final del universo”, recibió el prestigioso Premio Winton para Libros de Ciencia en 2013. Sean Carroll se adentra en la revolucionaria búsqueda del bosón de Higgs, la elusiva partícula (la partícula de Dios) que constituye la base de nuestra comprensión del universo. Esta narrativa cautivadora retrata los extraordinarios desafíos, intensas rivalidades y triunfos científicos en torno al monumental descubrimiento en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN. Carroll ofrece una exploración fascinante de las personas y las ideas que impulsaron la física hacia su actual frontera, brindando a los lectores una visión cautivadora de uno de los logros más significativos de la ciencia moderna. Avancemos rápidamente al

4 de julio de 2012, en una conferencia internacional de física en Melbourne, donde se presentan los resultados tan esperados del LHC (Gran Colisionador de Hadrones). Los físicos revelan evidencia de una nueva partícula, posteriormente identificada como el bosón de Higgs, una partícula fundamental integral para la masa[29] de otras partículas. Este descubrimiento representa un logro monumental en la física, celebrado a nivel mundial. La física de partículas es una búsqueda intrigante en la que miles invierten sus vidas y miles de millones de dólares para estudiar partículas subatómicas, aparentemente sin un impacto directo en la vida cotidiana. Este esfuerzo refleja la curiosidad innata de la humanidad por entender el universo. El comienzo del siglo XXI marca un momento crucial, ya que los últimos resultados inesperados de los aceleradores de partículas surgieron hace más de treinta y cinco años, principalmente debido a la efectividad de las teorías existentes en lugar de por deficiencias experimentales.

La materia está compuesta por diversas sustancias, semejantes a bloques de Lego, construidas a partir de un número limitado de partículas elementales. A lo largo de la historia, las culturas han buscado definir estos bloques de construcción, lo que eventualmente llevó a la comprensión de los átomos, que a su vez están hechos de quarks y electrones, reconocidos hoy como partículas elementales. El libro "La partícula al final del universo: Del bosón de Higgs al umbral de un nuevo mundo" es una obra de divulgación científica que nos va llevando poco a poco al bosón de Higgs. Por sucesivas aproximaciones, el lector aprende que el mentado bosón es una vibración extraordinariamente fugaz del

[29] La masa en física es la medida de la cantidad de materia que tiene un objeto. Es una propiedad fija que no cambia sin importar el lugar. Su unidad oficial es el kilogramo (kg)

campo Higgs, el campo de energía que ocupa el espacio vacío; se entera de que dicha partícula determina la masa del electrón, sin la cual no habría átomos y la materia que forma nuestro universo se desintegraría; comprende por qué su búsqueda exigió la construcción cerca de Ginebra del mayor acelerador de partículas del mundo, el LHC: un túnel con una circunferencia de 27 kilómetros y un diámetro de 8,6km, que costó unos 6.600 millones de euros; y se entusiasma junto a los seis mil científicos que aquel 4 de julio gritaron ¡Eureka! Tras detectarse algo que, si no es el mismísimo bosón de Higgs, se le parece muchísimo.

En paralelo, el lector ha advertido que esta proeza "no es solo una historia de partículas subatómicas, sino también de dinero, política y celos", vale decir: de lucha por la financiación, de egos monumentales e intrigas en la república de la ciencia, incluido un divertido episodio de cómo datos preliminares se filtraron a las redes sociales generando rumores falsos y enfados mayúsculos. La travesía culmina en el umbral del mundo nuevo referido en el subtítulo; un umbral que el bosón de Higgs ayudará a traspasar sirviendo de "puente entre lo que conocemos y lo que esperamos conocer: la antimateria, la materia oscura, la supersimetría". Para Carroll su hallazgo "supone el final de una era y el principio de otra"; aunque para su colega Stephen Hawking hubiera sido más apasionante no hallarlo y tener que idear otra teoría en reemplazo del Modelo Estándar. Esta encendida apología de la ciencia básica, del afán desinteresado de saber -tan despreciado por el utilitarismo corto de miras- queda condensada en la respuesta del físico estadounidense empeñado en construir un costoso acelerador de partículas, al senador que le preguntaba qué aportaría a la defensa de Estados Unidos: "Nada, salvo contribuir a que merezca la pena

defenderlo". Los puntos clave sobre esta obra, son los de una explicación detallada y accesible sobre el bosón de Higgs, a menudo descrito como uno de los descubrimientos científicos más importantes de las últimas décadas. Explora cómo esta partícula fundamental ayuda a comprender el origen de la masa y cómo encaja en nuestra comprensión actual del universo, incluyendo detalles sobre el Gran Colisionador de Hadrones.

## 8.1. ¿Por qué la vida es como es?

"Hay un agujero negro en el corazón de la biología.[30] Dicho sin rodeos: no sabemos por qué la vida es como es. Toda la vida compleja sobre la Tierra comparte un antepasado común, una célula que surgió de progenitores bacterianos simples en una única ocasión en cuatro mil millones de años. ¿Se trataba de un extraño accidente, o bien otros «experimentos» en la evolución de la complejidad fracasaron? No lo sabemos". Así comienza el libro de Nick Lane "*La cuestión vital"* y nos sigue ilustrando la complejidad y mundos

[30] Nick Lane utiliza la metáfora del "agujero negro" para describir la falta de comprensión sobre por qué la vida evolucionó de la forma en que lo hizo.

invisibles de la biología. Todos los seres vivos complejos comparten un catálogo sorprendente de caracteres o rasgos complicados, desde el sexo, el suicidio celular y a la senescencia, ninguno de los cuales se ven de forma comparable en las bacterias. No hay acuerdo acerca de por qué tantos rasgos únicos se acumularon en aquel antepasado único, o por qué ninguno de ellos muestra señal alguna de haber evolucionado de forma independiente en las bacterias. ¿Por qué, si todos estos caracteres surgieron por selección natural, en la que cada paso ofrece alguna pequeña ventaja, *no aparecieron caracteres equivalentes en otras ocasiones en varios grupos bacterianos*? Todos los organismos morfológicamente complejos (todas las plantas, animales, hongos, algas marinas y «protistas» unicelulares como las amebas) descienden de aquel antepasado singular desde hace mil quinientos a dos mil millones de años. Este *antepasado* era reconocible como una célula «moderna», con una estructura interna exquisita y un dinamismo molecular sin precedentes, todo ello accionado por complicadas nanomáquinas codificadas por miles de genes nuevos que son desconocidos en gran medida en las bacterias. No existen intermedios evolutivos que hayan sobrevivido, no hay «eslabones perdidos» que nos proporcionen alguna indicación de cómo o por qué surgieron dichos rasgos, sólo un vacío inexplicado entre la simplicidad morfológica de las bacterias y la asombrosa complejidad de todo lo demás. Un agujero negro evolutivo.

Gastamos -explica el autor- anualmente miles de millones de dólares en investigación biomédica, intentando descubrir las respuestas a preguntas inimaginablemente complejas acerca de por qué enfermamos. Conocemos en un detalle enorme de qué manera genes y proteínas están mutuamente relacionados, cómo las redes

de regulación repercuten unas en otras. Construimos complicados modelos matemáticos y diseñamos simulaciones informáticas para que lleven a cabo nuestras proyecciones. ¡Pero no sabemos *cómo evolucionaron las partes*! ¿Cómo podemos esperar entender las enfermedades si no tenemos ni idea de por qué las células funcionan de la manera en que lo hacen? No podemos comprender la sociedad si no sabemos nada de su historia; ni tampoco podemos comprender el funcionamiento de la célula si no sabemos cómo evolucionó. Este no es únicamente un asunto de importancia práctica. Se trata de cuestiones humanas de saber por qué estamos aquí. ¿Qué leyes dieron origen al universo, las estrellas, el Sol, la Tierra y a la misma vida? ¿Acaso las mismas leyes engendraron vida en otras partes del universo? ¿Será la vida extraterrestre parecida a nosotros? Estas preguntas metafísicas se hallan en el meollo de lo que nos hace humanos. Unos 350 años después del descubrimiento de las células, seguimos sin saber por qué la vida sobre la Tierra es como es. Espero convencer al lector de que la energía es fundamental para la evolución, que sólo podemos comprender las propiedades de la vida si ponemos la energía en la ecuación. Quiero mostrar al lector- dice el autor Nick Lane- que esta relación entre energía y vida se remonta al inicio: que las propiedades fundamentales de la vida surgieron necesariamente del desequilibrio de un planeta inquieto. Quiero mostrarle que el origen de la vida fue impulsado por un flujo de energía, que los gradientes de protones fueron básicos para la aparición de las células y que su uso limitó la estructura de bacterias y arqueos. Quiero demostrar que estas limitaciones dominaron la evolución posterior de las células, haciendo que bacterias y arqueos permanecieran para siempre simples en su morfología, a pesar de su virtuosismo bioquímico. Quiero demostrar que un acontecimiento

raro, una endosimbiosis en la que una bacteria se introdujo en un arqueo, rompió estas limitaciones, permitiendo así la evolución de células muchísimo más complejas. Quiero mostrar al lector que esto no fue fácil, que la relación íntima entre células, una de las cuales vivía dentro de otra, explica por qué los organismos morfológicamente complejos surgieron sólo una vez. Espero conseguir más, persuadir al lector de que esta relación íntima predice realmente algunas de las propiedades de las células complejas. Estas características incluyen el núcleo, el sexo, dos sexos e incluso la distinción entre la línea germinal inmortal y el cuerpo mortal: los orígenes de una duración definida de la vida y de una muerte determinada.

La naturaleza aborrece el vacío, dijo Aristóteles. Dos milenios después, Newton se hizo eco de la idea. A ambos les preocupaba lo que llena el espacio; Newton creía que era una sustancia misteriosa conocida como el éter. En física, la idea cayó en descrédito en el siglo XX, pero el *horror vacui (horror del vacío)* conserva toda su fuerza en ecología. La ocupación de todos los espacios ecológicos queda perfectamente captada por una antigua rima: «Las pulgas grandes tienen pulgas pequeñas en su dorso que las muerden; las pulgas pequeñas tienen pulgas más pequeñas, y así ad infinítum». Todos los nichos concebibles están ocupados, y cada especie está exquisitamente adaptada a su propio espacio. Cada planta, cada animal, cada bacteria, es un hábitat en sí mismo, una jungla de oportunidades para todo tipo de genes saltadores, virus y parásitos, por no decir nada de los grandes depredadores. Cualquier cosa y todo vale. Excepto que NO es así. *Sólo lo parece*. El tapiz infinito de la vida no es más que una apariencia, con un agujero negro en su meollo. Ya es hora de abordar la mayor de las paradojas en biología:

¿por qué la vida en la Tierra está dividida en procariotas, que carecen de complejidad morfológica, y eucariotas, que comparten un número enorme de propiedades intrincadas, ninguna de las cuales se encuentra en los procariotas? Hay *una brecha, una sima, un vacío* entre ambos, que la naturaleza tendría realmente que aborrecer. Todos los eucariotas lo comparten más o menos todo; todos los procariotas tienen, desde un punto de vista morfológico, prácticamente nada. No hay mejor ilustración del dogma bíblico de la desigualdad: «Pues al que tiene se le dará».

Creo que podemos llegar razonablemente a la conclusión de que la vida compleja será rara en el universo: no existe una tendencia innata en la selección natural a dar lugar a los humanos o a cualquier otra forma de vida compleja. Es mucho más probable quedarse atascado al nivel bacteriano de complejidad. La existencia de Parakaryon myojinensis podría ser alentadora para algunos: múltiples orígenes de complejidad en la Tierra significan que la vida compleja podría ser más común en otras partes del universo. Quizá. Lo que quiero aducir con más certeza es que, por razones energéticas, la evolución de la vida compleja requiere una endosimbiosis entre dos procariotas, y este es un acontecimiento aleatorio y raro, inquietantemente cercano a un accidente inesperado, que todavía resulta más difícil debido al consiguiente conflicto íntimo entre células. Con este párrafo anterior lo que queremos decir es que las células simples y pequeñas (procariotas) necesitaban unirse y vivir una dentro de otra para conseguir la gran cantidad de energía necesaria para crear células complejas (eucariotas). Como esto exige que una bacteria no mate ni digiera a la otra, se considera un suceso extremadamente difícil que casi parece un golpe de suerte de la naturaleza. Una célula simple no

tiene suficiente energía interna para crecer y mantener estructuras grandes. La *Teoría de la endosimbiosis* explica que una célula absorbió a otra para usarla como una "fábrica de energía" (la mitocondria). Sin esa cooperación interna, la vida compleja nunca habría despegado. Que un microbio engulla a otro y en vez de comérselo formen un equipo estable es algo extraordinario. La probabilidad de que esto ocurriera de manera útil era tan baja que parece un error afortunado de la historia natural. Si este "accidente" no hubiera pasado, hoy no existirían animales, plantas ni seres humanos. Esto sigue siendo una gran intuición, porque el concepto realmente desafía la idea de que la evolución siempre avanza en línea recta. En lugar de pequeños cambios acumulados poco a poco, la vida dio su mayor salto gracias a un choque y una tregua entre dos microbios.

Las mitocondrias tienen su propio ADN porque *originalmente eran bacterias independientes* antes de ser absorbidas por la célula hospedadora. Parece lógico pensar que cada célula tenga su propio ADN, en nuestras células ocurre una excepción fascinante: tenemos dos tipos de ADN totalmente diferentes en lugares distintos. Hace miles de millones de años, la mitocondria era un organismo libre con su propio genoma. Al integrarse dentro de la otra célula, no perdió todo su material genético, sino que conservó una parte esencial. Mantiene ese ADN propio para fabricar rápidamente sus propias proteínas energéticas sin esperar órdenes del núcleo celular. A diferencia del ADN del núcleo (que es mitad de tu padre y mitad de tu madre), el ADN mitocondrial lo heredas únicamente *de tu madre*. Para entenderlo de forma sencilla, imagina que tu célula es una gran fábrica. *El ADN del núcleo* es el manual principal de la empresa. Está en la oficina central (el núcleo) y contiene los planos para construir

todo tu cuerpo (ojos, piel, órganos). *El ADN de la mitocondria e*s un folleto de instrucciones exclusivo que está dentro del motor de la fábrica. Solo sirve para que el motor siga funcionando y generando energía. Es posible que ya sabiendo esto nos surja una pregunta. ¿El ancestro celular quiere decir que la vida y su complejidad eliminan la evolución? Esta es una pregunta filosófica y científica de altísimo nivel que los mismos biólogos se hicieron durante mucho tiempo. Para muchos la respuesta corta es no, no la eliminan; al contrario, la aceleran y la llevan a otro nivel**.** El ancestro celular y ese "accidente" no rompen las reglas de la evolución, sino que abrieron las puertas para que pudiera crear cosas mucho más grandes. Antes del “accidente”, las bacterias llevaban miles de millones de años estancadas siendo simples. El "accidente" de la mitocondria les dio una batería superpotente. El evolucionista ahora dirá que con tanta energía sobrante las células por fin pudieron permitirse el lujo de cometer errores, mutar y probar nuevos diseños sin morir en el intento. Pero mi pregunta de pensador escéptico ¿Dónde están los nuevos diseños, porque habrán quedado fósiles? El problema de los fósiles es que lo que se ha encontrado desde el Cámbrico son modelos perfectos diseñados y preparados para la vida en su hábitat.

Ahora la evolución no es que "el más fuerte mata al débil". A veces, el que mejor coopera es el que sobrevive. La endosimbiosis es el ejemplo máximo de evolución por cooperación. Una vez que las dos células se unieron, la selección natural (el motor de la evolución) siguió funcionando. Si esa unión no hubiera sido eficiente, la selección natural la habría extinguido de inmediato. Y seguimos preguntándonos ¿dónde están los restos de esa muerte?

Se dice que el ancestro celular no eliminó la evolución; lo que hizo *fue darle las piezas correctas*. Pero ¿Cómo puede darle las piezas

correctas una selección natural sin diseño y propósito? Nos ponen el ejemplo de la evolución como un niño jugando con bloques de madera (bacterias) y de repente alguien le regala un motor eléctrico (la mitocondria). El juego no se detiene, pero ahora el niño puede construir naves espaciales en lugar de simples torres. ¡Mucho ha mejorado la evolución que o es Dios para construir naves espaciales o es el azar con juguetes de madera¡ Sin embargo, la ciencia explica que lo que parece un "propósito" es en realidad el resultado de un filtro implacable: *la selección natural*, la cual genera la ilusión de diseño a posteriori. La mitocondria no entró a la otra célula *con la intención* de ayudarla, ni la célula la absorbió *para* fabricar energía. Simplemente ocurrió un accidente físico. Millones de otras uniones celulares fallaron, murieron y desaparecieron sin dejar rastro porque eran ineficientes. Solo sobrevivió la combinación que funcionaba bien. Lo que hoy vemos es únicamente la combinación ganadora tras miles de millones de años de descarte. Por eso parece "perfecta", porque los "intentos fallidos" ya no están aquí para que los veamos. Sin embargo, con esta forma de pensar las preguntas siempre serán nuevas. ¿Cómo sabe la selección natural que funcionaba deficientemente? ¿Cómo sabe que la combinación ganadora es la conveniente y para qué es conveniente? Seguimos en la primera línea de salida.

Para entender cómo se genera esta apariencia de diseño sin que exista un plano previo, la biología suele compararlo de la siguiente manera. Piensa el problema de antemano, dibuja los planos de un motor y construye la máquina perfecta desde el primer intento. Funciona como un "relojero ciego". Lanza miles de millones de piezas al azar constantemente. Las combinaciones que no funcionan se destruyen de inmediato. La única combinación que logra seguir

funcionando y replicándose (la célula compleja) da la impresión de haber sido planeada, pero es el resultado de la pura supervivencia. El "propósito" de la vida, científicamente hablando, no es una meta final que la célula conocía de antemano; su único motor es la *autoconservación y la reproducción* de lo que funciona en un entorno determinado. ¿y esto quien lo dice, lo decide o lo interpreta? ¿La selección, el azar, las leyes naturales? ¿Cómo se crearon esas leyes? El evolucionismo insiste en contarnos cuentos de accidentes con los que se construyen máquinas complejas que no se sabe para qué sirven. Pero yo sigo viendo un mundo maravilloso, admirable en su complejidad, donde el hombre va descubriendo cosas. Se nos dice que la evolución es como jugar a las cartas: Las mutaciones genéticas y los accidentes celulares ocurren de forma totalmente aleatoria. La naturaleza te da una mano de cartas al azar, sin importar si son buenas o malas. Que una bacteria se tragara a otra fue un golpe de suerte azaroso. Aquí se acaba el azar. Si tus cartas son horribles (por ejemplo, una mutación que hace que la célula no pueda respirar), *físicamente mueres*. El entorno (el frío, el calor, los depredadores, la falta de alimento) actúa como un colador físico. Solo las cartas que mejor se adaptan a las reglas físicas del mundo logran sobrevivir y reproducirse. El azar propone los cambios de forma ciega, pero *la selección natural dispone quién vive de forma implacable.* No hay sabiduría ni mente detrás, solo física y matemáticas: lo que funciona se copia, lo que no funciona desaparece. Por eso vemos orden y complejidad, no porque haya un propósito, sino porque el caos ineficiente fue eliminado por completo en el pasado.

Esto se puede entender bien, si fuera verdad que la selección natural “selecciona”. ¿Cómo sabe que va a dar vida a un escarabajo

pelotero, a una mariposa o a un ser humano? ¿Todo por el azar que propone y la diosa selección dispone? Cuando ponen ejemplos los evolucionistas como las bacterias volviéndose resistentes a los antibióticos actuales no deja de ser una simple bacteria no un mundo complejo y causi infinito. Ya decía Antonio Lazcano Araujo: “Tratamos de hacer una ciencia objetiva, pero el ambiente sociopolítico sesga nuestra percepción de la realidad” — Al fin y al cabo, la ciencia consiste en lo reproducible y determinista, que es justo lo opuesto al azar.

Nos dirán que las leyes físicas no las dicta nadie con un propósito; existen como **propiedades intrínsecas y constantes del universo**, y los accidentes no tienen un fin, sino consecuencias necesarias debido a esas mismas leyes. Cuando un accidente ocurre, el resultado puede encajar de forma tan perfecta en su entorno que nuestra mente interpreta que tenía el "propósito" de llegar ahí, pero la ciencia demuestra que es un efecto de la causalidad. Y todo esto para concluir que no hay legislador. En la ciencia actual, las leyes de la física (como la gravedad o el electromagnetismo) no son mandatos dictados por alguien, sino descripciones matemáticas de cómo se comporta la materia y la energía. Existen desde el Big Bang. El universo funciona así porque, si estas constantes físicas fueran ligeramente diferentes, la materia ni siquiera se habría agrupado para formar átomos, estrellas o planetas. Pero todo es causalidad no finalidad. Este mundo fascinante y cuasi infinito es un accidente que no tiene propósito.

Un accidente celular ocurre por causas físicas previas (dos microbios chocaron y uno envolvió al otro debido a las fuerzas de sus membranas). Produce consecuencias (generación de energía), pero no ocurrió *para* lograr esa consecuencia. Creemos que el accidente

tenía el propósito de crear vida compleja porque nosotros, que somos el resultado, estamos aquí para contarlo. No vemos los billones de accidentes idénticos que terminaron en muerte y destrucción porque no dejaron rastro. O al menos esto es lo que la ciencia dice ahora. Los seres humanos somos animales que planificamos todo con un fin (hacemos un fuego *para* calentarnos). Por eso, cuando vemos que un accidente físico da un resultado excelente, proyectamos nuestra propia forma de pensar y asumimos que el accidente ocurrió *para* cumplir ese fin. La física aporta las reglas del tablero, el azar mueve las piezas de forma ciega y la selección natural elimina las jugadas que no funcionan. Lo que llamamos "propósito" es simplemente **la** *jugada que logró sobrevivir.* Aunque yo no conozco ningún ganador de juegos que no tenga su estrategia y solo gane por casualidad porque sin estrategia ni sabrá que ha ganado, como cuando yo jugaba con el tonto del pueblo que ganaba por azar, pero no lo sabía.

¿Podría la materia y la energía crear un trasatlántico en medio de un desierto? Los evolucionistas también se salen de rositas donde en este caso no puede jugar el azar y la necesidad. No dicen que hay una diferencia crucial entre objetos artificiales y los seres vivos. Y es que se me olvidó decir que estaba lleno de seres humanos que lo habían construido. Entonces el evolucionista empieza su explicación. El desierto tiene materia (arena, hierro bajo el suelo) y energía (sol, viento). El viento puede soplar durante miles de millones de años y acumular granos de arena, creando dunas preciosas. Pero el viento no tiene un mecanismo para "guardar" los aciertos. Si el viento hoy forma algo parecido a un tornillo de metal por puro azar, la tormenta de mañana lo destruirá. El azar solo destruye la complejidad si no hay un sistema que la herede. ¡La misma historia¡ Un barco no puede reproducirse. No tiene hijos. No hay "barcos bebés" compitiendo por

sobrevivir en el desierto, donde los barcos defectuosos mueran y los barcos un poco mejores dejen descendencia. La primera célula no apareció de golpe como un transatlántico en el desierto. La evolución biológica sí pudo lograr la complejidad debido a tres factores que el desierto no tiene. La vida no empezó directamente con una célula compleja. Empezó con moléculas químicas muy simples que se unían en el agua. A diferencia de la arena del desierto, cuando una molécula viva lograba un cambio ventajoso, ese cambio quedaba grabado en su código genético y se copiaba a la siguiente generación. La evolución no empieza de cero en cada generación; construye sobre lo que ya funcionaba antes.

Cuando preguntamos por la complejidad irreductible por ejemplo en la ratonera a la que si le falta uno de los cinco elementos no caza ratones. Este argumento sostiene que ciertos sistemas biológicos no pudieron evolucionar paso a paso porque las piezas sueltas no tendrían ninguna función útil por separado, por lo que la selección natural las habría eliminado antes de que el sistema se completara. Sin embargo, la biología evolutiva ha respondido directamente a este dilema de la ratonera (y a los ejemplos biológicos de Behe, como el flagelo bacteriano) demostrando que la evolución sí tiene un mecanismo para resolverlo sin necesidad de un propósito previo. Este mecanismo se basa en dos conceptos clave:

La evolución no intenta construir una ratonera desde el principio. Lo que suele ocurrir es que las piezas individuales ya existían antes en la célula, pero cumpliendo funciones totalmente diferentes. Si usamos la misma analogía de la ratonera de Behe: El gancho metálico pudo haber sido antes un simple sujetapapeles. El muelle pudo haber sido un resorte para un reloj. La base de madera pudo haber sido una regla. Ninguno de esos elementos se diseñó

para cazar ratones. (Yo que no creo en reencarnación, con estas explicaciones puede ser que en nombre de la evolución me seleccionen para pisapapeles.) Pero un buen día, por *puro azar físico,* esas tres piezas que ya existían para otras cosas se juntaron y, de repente, demostraron una nueva habilidad secundaria: atrapar un ratón. A partir de ese momento, la selección natural "premió" esa nueva combinación porque era útil. ¿Pero cómo sabe la selección natural que era útil, si a lo mejor no había ratones? En biología, esto se llama e*xaptación*: usar herramientas viejas para trabajos nuevos. Todo un acervo de explicaciones se da en esta idea evolucionista que para mí le falta alguna pata y cojea, porque yo vuelvo a las mismas preguntas trascendentales. No sé cómo se ha creado este mundo-universo. En el caso de la vida nos seguimos haciendo las mismas preguntas trascendentales, pero algunas cosas ya sabemos como que la primera célula compleja (el ancestro) solo tenía la información necesaria para ser *una buena célula individual*: cómo respirar, cómo dividirse y cómo gestionar su energía con su nueva mitocondria. En su ADN no había ni una sola línea de código que dijera cómo hacer un ojo, un corazón, un ser humano o un dinosaurio. Esas instrucciones no existían en absoluto hace miles de millones de años.

A veces nos dicen que el ADN es el "plano de un ser humano", y eso nos hace pensar en un arquitecto que dibuja una casa antes de construirla. Pero el ADN funciona de otra manera, nos dicen: Un plano te muestra el resultado final (aquí va la ventana, aquí la puerta). Si cambias una línea al azar, la casa no se cae o se arruina. Una receta te da instrucciones paso a paso (añade harina, remueve, hornea). Si cambias un ingrediente al azar (mutación), no rompes un plano del futuro; simplemente obtienes un bizcocho con un sabor

diferente hoy. El ancestro celular tenía una receta muy básica (hacer sopa). Con el paso del tiempo, el azar (mutaciones, rayos ultravioleta, errores de copia) fue cambiando palabras de esa receta. La mayoría de los cambios dieron sopas horribles que se tiraron a la basura (la célula moría). Pero, de vez en cuando, un error al azar hizo que la sopa supiera a estofado. Y miles de millones de años después, esa receta mutada capa tras capa terminó convirtiéndose en la receta de un ser humano. ¿y porque se aceptó por parte de la selección natural esa receta de un hombre tan imperfecto, como entendía Job? Quizás esta sea la confusión que me marea. Hoy en día, una célula tuya (como un óvulo fecundado) sí contiene toda la información para formar un ser humano. Pero, ¿por qué? Contiene esa información porque es el resultado final de 4.000 millones de años de acumulación de errores afortunados. Tu célula actual tiene el libro de recetas ya madurado y escrito por la historia de la supervivencia. El ancestro, en cambio, tenía la primera página en blanco. Estaríamos jugando con la pelota del evolucionismo, aunque como decía al principio de esta sección Nick Lane: “Hay un agujero negro en el corazón de la biología. Dicho sin rodeos: no sabemos por qué la vida es como es”-

La biología científica, atada por sus propias reglas a los hechos físicos externos, se ve obligada a pasar por alto la dimensión de interioridad propia de la vida. Hace desaparecer así la diferencia entre «animado» e «inanimado», y al mismo tiempo convierte esa vida, que explica en su integridad desde el punto de vista material, en algo cuyo sentido es todavía más enigmático de lo que lo era antes de recibir esa explicación. Los dos puntos de vista, que desde Descartes se mantienen antinaturalmente separados, guardan una relación de complementariedad lógica. Con la intención de afirmarse

a sí mismo, cada uno le hace en realidad el juego al otro a la vez que perjudica su propio objeto, de modo que al cabo ambos salen malparados: la comprensión del hombre sufre por esa separación tanto como la de la vida extrahumana. Una filosofía de la vida tiene por objeto la filosofía del organismo y la filosofía del espíritu. Este es ya un primer enunciado de la filosofía de la vida. Se trata, de hecho, de una hipótesis que ya adelanta y que tendrá que demostrar. Pues el anuncio significa que lo orgánico prefigura lo espiritual ya en sus estructuras inferiores, y que el espíritu sigue siendo parte de lo orgánico incluso en sus más altas manifestaciones. De las dos mitades de esta afirmación solamente la segunda, y no la primera, está en consonancia con el pensamiento moderno, mientras que únicamente la primera mitad, y no la segunda, es conforme al pensamiento antiguo.

Con independencia de la historia de su génesis, con independencia, por tanto, de los hallazgos de la investigación acerca de la evolución, la simultánea multiplicidad de la vida, especialmente de la animal, se nos muestra como una secuencia gradual y creciente entre lo «primitivo» y lo «evolucionado». En esa escala tienen su lugar la complejificación de la forma y la diferenciación de la función, la sensibilidad de los órganos sensoriales y la intensidad de los instintos, el control de los miembros y de las capacidades de actuar, la reflexión de la conciencia y la búsqueda de la verdad. Aristóteles leyó esta jerarquía en los datos de la vida orgánica, sin necesitar para ello la idea de evolución. Su obra *De anima* es el primer tratado de biología filosófica. Las condiciones teóricas en las que su gran ejemplo podría ser retomado en nuestra época son muy diferentes de las suyas, pero la noción de una secuencia gradual, de un progresivo depositarse de capas, cada una de las cuales depende de

las inferiores a la par que las conserva, seguirá siendo imprescindible.

La enumeración de mundos que no fueron es un juego de salón sin fin, pues, ¿quién puede contar las posibilidades? El universo no se halla tan estrechamente interconectado que la caída de un pétalo haga pedazos una estrella distante, canten lo que canten los poetas. Pero la mayoría de los cambios caprichosos de topografía o de ambiente, la mayoría de las apariciones y desapariciones de grupos (si no de especies individuales), pueden alterar irrevocablemente los caminos de la vida de maneras sustanciales. El terreno de juego del destino es inconmensurable. Consideremos sólo un escenario alternativo, para dirigirlo al objeto biológico que más excita nuestra fantasía provinciana: Homo sapiens. Evolución de la célula eucariota.

Supongamos que la vida surgió hace al menos 3.500 millones de años, aproximadamente tan pronto como la Tierra se enfrió lo suficiente para permitir la estabilidad de los componentes químicos principales. Dada la composición de las atmósferas y océanos primitivos, el origen de la vida fue una necesidad química. La contingencia surge después, cuando la complejidad histórica entra en el cuadro de la evolución. Con respecto a la antigua creencia en el progreso uniforme, nada puede ser más extraño que la evolución temprana de la vida, pues durante tan largo tiempo no ocurrieron muchas más cosas. *Los fósiles más antiguos* son células procariotas de unos 3.500 millones de años de antigüedad. *El registro fósil* de esta época incluye asimismo la forma más elevada de complejidad macroscópica desarrollada por estos procariotas: los estromatolitos.

Los estromatolitos y sus constructores procariotas dominaron el registro fósil en todo el mundo durante más de 2.000 millones de años. Las primeras células eucariotas (de la variedad compleja de los

libros de texto, completa con núcleo y numerosas estructuras en el citoplasma) aparecieron hace unos 1.400 millones de años. El argumento convencional sostiene que las células eucariotas son un prerrequisito para la complejidad pluricelular, aunque sólo sea porque la reproducción sexual exigía cromosomas duplicados, y sólo el sexo puede proporcionar la variación que la selección natural necesita como materia prima para una ulterior complejidad. Pero los animales pluricelulares no surgieron poco después del origen de las células eucariotas; aparecieron por vez primera justo antes de la explosión del Cámbrico, hace unos 570 millones de años. Así, pues, bastante más de la mitad de la historia de la vida es solamente un relato de células procariotas, y únicamente el último sexto del tiempo de la vida sobre la Tierra ha incluido animales pluricelulares.

En la noción de Margulis en 1981 cada célula eucariota es, por origen, una colonia que posteriormente consiguió una integración más fuerte. Ciertamente, la mitocondria que por primera vez penetró en otra célula no estaba pensando en los futuros beneficios de la cooperación y la integración; estaba simplemente intentando ganarse la vida en un duro mundo darviniano. La vida terminará a menos que pueda desplazarse a otro lugar; y, en cualquier caso, la vida sobre la Tierra acabará. Puesto que la inteligencia humana surgió hace sólo un segundo geológico, nos enfrentamos al hecho pasmoso de que la evolución de la autoconciencia requirió alrededor de la mitad del tiempo potencial de la Tierra. Dados los errores y las incertidumbres, las variaciones de las tasas y de las rutas en otra reproducción de la cinta, ¿qué posible confianza podemos tener en el origen eventual de nuestras capacidades mentales distintivas?

La vida humana es un profundo misterio porque combina la realidad biológica con una rica vida interior, conciencia moral y la

búsqueda constante del sentido de la existencia. Este enigma abarca desde nuestro origen en el universo hasta los límites inevitables del nacimiento y la muerte. El ser humano se diferencia de otros seres vivos por poseer autoconciencia, capacidad de diálogo y la facultad de formularse preguntas esenciales sobre el bien, el mal y el propósito de vivir. Esta interioridad genera un sentido de responsabilidad moral y una búsqueda constante de plenitud que va más allá de la mera supervivencia física. Desde una perspectiva científica, la vida representa una transición fascinante desde la materia inerte hasta sistemas moleculares complejos capaces de autorreplicarse. Un ejemplo del gran enigma bioquímico es la quiralidad[31]: las moléculas de la vida (como los azúcares y aminoácidos en nuestro cuerpo) utilizan de *manera exclusiva* una sola orientación espacial, un fenómeno único que la ciencia sigue investigando. El nacimiento y la muerte son las fronteras donde el misterio de la vida se experimenta con mayor intensidad. El nacimiento despierta la esperanza de un nuevo comienzo, mientras que la muerte confronta a la humanidad con lo desconocido y plantea interrogantes trascendentales sobre el destino final de la persona. A nivel molecular, la quiralidad es fundamental para la vida: Enantiómeros (moléculas que actúan como imágenes especulares no superponibles entre sí) Son las dos versiones "izquierda" y "derecha" de una misma molécula quiral. Mismo contenido, distinta forma: Tienen los mismos átomos y enlaces, pero distribuidos de forma simétrica inversa. La vida en la Tierra es homoquiral. Las

[31] La quiralidad es la propiedad de un objeto de no ser superponible con su imagen especular (su reflejo en el espejo). El ejemplo más sencillo son tus propias manos: la mano derecha es el reflejo de la izquierda, pero si intentas poner una sobre la otra con las palmas hacia el mismo lado, los pulgares apuntan a direcciones opuestas y no encajan. Mano Izquierda, Mano Derecha

proteínas humanas solo usan aminoácidos "izquierdos" (levógiros), mientras que el ADN y el ARN solo usan azúcares "derechos" (dextrógiros). ¿Por qué es crucial para el cuerpo? Los receptores de tus células son como cerraduras que solo aceptan una de las dos "llaves" quirales: Olor: Una versión de la molécula carvona huele a menta; su reflejo huele a comino. Un lado de una molécula puede curar una enfermedad, mientras que el otro lado puede ser completamente inútil o incluso tóxico.

En la actualidad, la filosofía entiende al ser humano no como una esencia fija o puramente racional, sino como un ser dinámico, interconectado, tecnológico y en constante construcción. Tras la caída de las verdades absolutas del pasado, la antropología filosófica del siglo XXI analiza nuestra identidad a través de varios enfoques clave. La filosofía actual ya no separa al humano de sus herramientas. Con el auge de la inteligencia artificial, la edición genética y las redes digitales, pensadores contemporáneos nos entienden como seres cuya mente e identidad se extienden y modifican a través de la tecnología. Se debate intensamente dónde termina lo biológico y dónde empieza lo artificial. Por otra parte, un ser vulnerable y eco-dependiente aparece frente al antiguo orgullo de creernos "dueños de la naturaleza", la filosofía del presente (marcada por la crisis climática) nos define por nuestra vulnerabilidad y dependencia del entorno. El ser humano es entendido como parte de un entramado vivo global, donde la supervivencia depende de la responsabilidad ética hacia otras especies y el planeta. Por último, un sujeto fragmentado e hiperconectado se analiza cómo la velocidad del mundo digital y el exceso de estímulos que lo fragmentan y alteran su psicología. Autores actuales apuntan a que el ser humano moderno vive bajo la "sociedad del cansancio" o del rendimiento,

autoexplotándose en busca de un éxito efímero y lidiando constantemente con la búsqueda de un sentido en un entorno acelerado. Pese a todas estas alteraciones el ser humano aparece como un ser corporal afectivo. Se ha superado definitivamente la idea clásica de que somos solo "razón pura". La filosofía de la mente y la fenomenología actuales defienden que el ser humano se comprende de manera integral: a través de sus emociones, su cuerpo y sus vivencias afectivas, las cuales guían sus decisiones tanto o más que el intelecto lógico.

## 8.2. Experiencias cercanas a la muerte

Conocemos con gran detalle el "cómo" funciona la vida a nivel molecular y celular, pero ignoramos el "por qué" fundamental de sus estructuras y leyes específicas. No existe un plano universal previo que dictamine por qué la química terrestre adoptó estas soluciones exactas y no otras. La física posee leyes universales deducibles de principios fundamentales, pero la biología carece de leyes equivalentes que predigan cómo debe ser un organismo de forma abstracta. Todo lo que vive en la Tierra responde a una serie de accidentes evolutivos únicos, lo que impide saber si la vida en otros rincones del cosmos se parecería a la nuestra o sería radicalmente distinta. El paso de materia inerte a sistemas capaces de replicarse y adaptarse sigue sin un principio físico unificador que lo haga inevitable. Infinidad de preguntas tenemos para poder entender la evolución de la vida y porqué esta clase de vida más allá de lo físico. Las experiencias cercanas a la muerte (ECM) son completamente reales como experiencias psíquicas y biológicas, pero la ciencia

actual determina que son el producto de un cerebro bajo condiciones extremas de estrés, hipoxia (falta de oxígeno) y oleadas de actividad neuroquímica, y no una prueba de una vida extracorporal. Para la persona que las vive, la sensación de paz, el túnel de luz o la desconexión del cuerpo se sienten tan reales como la vigilia porque el cerebro procesa esa actividad anómala con sus mecanismos habituales de percepción

Estudios recientes confirman que el cerebro sufre una oleada de actividad eléctrica de alta frecuencia (ondas gamma) justo después de que el corazón se detiene, lo que podría explicar la hiperconciencia y los recuerdos vívidos. La hipoxia (falta de oxígeno) en la corteza visual genera una visión de túnel y luces brillantes, mientras que la acumulación de dióxido de carbono altera la percepción del entorno. El sistema nervioso libera de forma masiva endorfinas, dopamina y serotonina para mitigar el dolor del trauma, provocando profundas sensaciones de paz, euforia y desapego. La desconexión temporal de la unión temporoparietal (la zona cerebral que integra tu cuerpo con el espacio) produce de forma matemática la famosa sensación de flotar o verse desde fuera. Sea como sea, las experiencias cercanas a la muerte son fenómenos intrigantes, una realidad que no podemos olvidar y hasta nos obliga a preguntarnos si ¿existe prueba científica de una vida después de la muerte?

Ya dijimos que, durante un paro cardíaco, la oleada final de ondas gamma representa un último e inesperado estallido de conectividad eléctrica altamente organizada, provocado por la falta crítica de oxígeno (hipoxia) en el tejido cerebral. Lejos de apagarse de forma pasiva o caótica, el cerebro realiza un esfuerzo coordinado final que imita los estados de máxima conciencia humana. Estudios neurocientíficos clave, como el de la Universidad de Míchigan

publicado en PNAS, revelan los procesos exactos que ocurren en esos instantes. Al retirarse el soporte vital o detenerse el corazón, la caída drástica de oxígeno y la acumulación de dióxido de carbono actúan como un interruptor de emergencia. En lugar de silenciarse, las neuronas sufren una despolarización masiva que desencadena una ráfaga de impulsos eléctricos. La tormenta de ondas gamma (las frecuencias más rápidas del cerebro, superiores a 25 Hz) se concentra con fuerza en la unión temporoparietal occipital (TPO). Esta región es la responsable directa del procesamiento sensorial, la integración espacial y los estados de sueño consciente o alucinación. Las diferentes áreas del cerebro no se desconectan entre sí inmediatamente. Al contrario, se registra una sincronía global y una conectividad funcional entre la zona posterior y la corteza prefrontal que llega a superar los niveles medidos en un estado de vigilia normal. Las ondas gamma rápidas se acoplan y "viajan" subidas a ritmos más lentos (ondas alfa y theta). En la neurociencia tradicional, este acoplamiento exacto es el biomarcador que define la memoria de trabajo, la atención focalizada y la recuperación de recuerdos complejos.

Este fenómeno explica por qué quienes sobreviven a un paro cardíaco reportan que su Experiencia Cercana a la Muerte (ECM) fue "más real que la propia realidad". Su cerebro ejecutó el mismo patrón físico que utilizamos para recordar, integrar sentidos y concentrarnos, pero a una intensidad máxima. En 2023, publicaron una investigación en la que se concentraron en cuatro pacientes que estaban en coma hasta entonces se creía que el cerebro humano en hipoxia es decir sin el oxígeno necesario para funcionar. reducía su actividad. Para averiguarlo, un estudio llevado a cabo en la Universidad de Míchigan (EE. UU.) registró la actividad sobre cuánto tiempo dura exactamente

el apagado clínico definitivo. El pico o "estallido masivo" de ondas gamma más intenso y coordinado dura exactamente entre 30 y 60 segundos inmediatamente después de que el corazón se detiene por completo o se retira el soporte ventilatorio. Sin embargo, el desvanecimiento de toda la actividad eléctrica cerebral no es un apagón instantáneo; sigue un cronograma biológico muy preciso antes del silencio clínico total. El flujo de sangre se corta por completo. En esta ventana de 30 segundos es cuando las ondas gamma alcanzan su máxima potencia y sincronía, generando la experiencia hiperreal, los recuerdos vívidos o la visión de túnel. Pasados esos primeros 30-60 segundos, las ondas gamma decaen drásticamente. El cerebro pierde la capacidad de procesar información compleja. Las neuronas se quedan sin glucosa ni oxígeno y empiezan a fallar de forma generalizada. Se produce el último evento eléctrico medible, conocido popularmente como la "onda de la muerte". Es una onda gigante de baja frecuencia (despolarización propagada) en la que las neuronas liberan toda su energía de reserva acumulada al romperse sus membranas celulares. Entre los 5 y 10 minutos sin reanimación, el electroencefalograma (EEG) se vuelve completamente plano.

En este punto ocurre la muerte cerebral irreversible porque las células empiezan a autodigerirse debido a la falta absoluta de energía (ATP). Existe un matiz importante descubierto en estudios recientes como el proyecto AWARE-II liderado por la Universidad de Nueva York: si los médicos realizan maniobras de Reanimación Cardiopulmonar (RCP) de forma continua, se puede mantener un flujo mínimo de oxígeno. Bajo estas condiciones de reanimación, se han registrado picos intermitentes de ondas gamma hasta 35 o 60 minutos después del paro cardíaco inicial. ¿Qué pasa después de la

muerte? Desde el punto de vista clínico, una persona muere cuando su corazón deja de latir. Hay un caso histórico que ocurrió debido a un accidente médico fortuito que proporcionó a la ciencia el primer registro continuo del electroencefalograma (EEG) de un cerebro humano en transición hacia la muerte. El hallazgo fue publicado originalmente en la revista científica [Frontiers in Aging Neuroscience]. Un hombre de 87 años ingresó en un hospital de Vancouver, Canadá, tras sufrir una caída que le provocó un hematoma subdural (acumulación de sangre en el cráneo). Tras ser operado, el paciente empezó a desarrollar crisis epilépticas graves y convulsiones. Para estudiar y controlar sus ataques, el equipo médico dirigido por el neurocirujano Dr. Ajmal Zemmar (en colaboración con el Dr. Raul Vicente) conectó al paciente a un sistema de EEG continuo para grabar su actividad cerebral en tiempo real. Mientras los electrodos registraban sus ondas cerebrales de forma rutinaria, el anciano sufrió un ataque cardíaco masivo y fatal. Debido a que su familia había firmado previamente una orden de No Reanimación (DNR), los médicos detuvieron cualquier intervención y la máquina siguió grabando pacíficamente todo su proceso de fallecimiento. Los neurocientíficos aislaron exactamente 900 segundos de la grabación en torno al paro cardíaco, concentrándose con lupa en los 30 segundos anteriores y posteriores a que el corazón dejara de bombear sangre.

Los resultados asombraron a la comunidad médica. En lugar de ver una caída lineal o un apagón caótico de electricidad, la máquina registró un incremento masivo en las oscilaciones gamma. Esas ondas gamma específicas no vibraban al azar; estaban perfectamente coordinadas con otras frecuencias como alfa, theta y beta. Esta combinación exacta es la misma firma eléctrica que

genera el cerebro cuando los seres humanos estamos recolectando recuerdos, soñando despiertos o en estados de meditación profunda. Los investigadores sugirieron que este patrón biológico podría ser la prueba neurofisiológica de por qué las personas que sobreviven a Experiencias Cercanas a la Muerte (ECM) informan de un "repaso de su vida" o aseguran haber visto sus recuerdos pasar ante sus ojos en cuestión de segundos. Aunque el descubrimiento dio la vuelta al mundo, el doctor Zemmar y su equipo pidieron prudencia. Se trataba del estudio de un solo paciente cuyo cerebro ya estaba alterado por la epilepsia, el trauma de la caída y la medicación anticonvulsiva, lo que impedía asegurar al 100% que todos los seres humanos sanos experimenten exactamente la misma tormenta de recuerdos antes de morir. Aun así, supuso la primera evidencia empírica de que el cerebro moribundo ejecuta un último plan minuciosamente organizado.

Desde el punto de vista de la biología evolutiva, un fenómeno que ocurre en los últimos segundos de vida presenta un gran dilema: la selección natural solo premia los rasgos que ayudan a sobrevivir o a reproducirse. Dado que un organismo moribundo ya no va a dejar descendencia, ¿por qué la evolución ha conservado este mecanismo tan complejo y costoso en energía? Los biólogos y neurocientíficos manejan principalmente tres hipótesis evolutivas para explicar este misterio: A/ La hipótesis del "Mecanismo de Supervivencia Extrema" (Efecto Secundario) Esta es la teoría más aceptada. Plantea que la oleada de ondas gamma no evolucionó para la muerte, sino para evitarla. Ante una caída drástica de oxígeno y presión sanguínea, el cerebro no sabe que está muriendo; interpreta que está sufriendo un trauma extremo. Para intentar salvar el organismo, el cerebro activa un protocolo de emergencia que libera un coctel masivo de

neurotransmisores y dispara la conectividad eléctrica al máximo. El objetivo real es mantener la consciencia un segundo más para encontrar una salida o luchar por sobrevivir. Las visiones, la hiperconciencia y el repaso de la vida serían simplemente el "efecto secundario" o la interpretación que hace nuestra mente de esa brutal inyección de energía desesperada. B/ La hipótesis del "Efecto Centinela" (Protección del grupo) La evolución no siempre opera a nivel puramente individual; a veces favorece rasgos que benefician a la tribu o a la especie (selección de parentesco).El peligro del pánico: Si un ancestro primitivo sufría un ataque de un depredador o una herida mortal en presencia de su clan, entrar en un estado de pánico violento, gritos de agonía o convulsiones caóticas atraería a más depredadores o desestabilizaría la seguridad de su grupo familiar. Se teoriza que un mecanismo que inunde el cerebro de endorfinas, paz y un estado de disociación e hiperconectividad calmada permitía una muerte silenciosa. Esto protegía la ubicación y la integridad de los familiares supervivientes que compartían sus mismos genes.

Por último, C/. La hipótesis del subproducto del desarrollo cerebral. Esta postura argumenta que el estallido final no tiene ninguna función evolutiva en absoluto, sino que es una consecuencia inevitable de cómo está construido nuestro cableado cerebral. Para mantener los recuerdos guardados y la actividad calmada, el cerebro gasta muchísima energía en mantener "compuertas" químicas (inhibición neuronal). Cuando la energía (ATP) cae a cero, esas compuertas se rompen de golpe. Toda la información, los sistemas visuales y los recuerdos acumulados se disparan a la vez en un cortocircuito masivo. No evolucionó para salvarnos ni reconfortarnos; es simplemente la forma física en que una red neuronal de hipercompleja se desmorona cuando se le corta la corriente. La

selección natural favorece los rasgos que dan a sus portadores una ventaja sobre el resto de su especie. ¿Los rasgos evolucionan en los animales para dar una mejor oportunidad de supervivencia a la especie, o para dar una mejor oportunidad de supervivencia al individuo de esa especie? Como la grabación del paciente con epilepsia en humanos fue un evento accidental, la ciencia necesitaba un entorno controlado para aislar el fenómeno. Los experimentos clave con ratones de laboratorio, liderados principalmente por la doctora Jimo Borjigin en la Universidad de Míchigan, permitieron confirmar de forma exacta las hipótesis del "mecanismo de supervivencia" y del "cortocircuito masivo". El experimento pionero (2013) de la doctora Borjigin y su equipo monitorizaron la actividad cerebral de nueve ratas de laboratorio mediante electroencefalogramas (EEG) continuos y altamente sensibles mientras se les inducía un paro cardíaco mediante inyección letal.

En los 30 segundos posteriores a que el corazón de los roedores dejara de latir, sus cerebros mostraron un incremento masivo en la potencia de las ondas gamma de alta frecuencia. Los científicos descubrieron que estas ondas estaban más coordinadas y conectadas entre distintas áreas del cerebro moribundo que cuando las ratas estaban completamente despiertas y sanas. Este estudio demostró que el estallido final no era una anomalía del paciente humano epiléptico, sino un mecanismo neurofisiológico generalizado en los mamíferos. El experimento de asfixia (2015) y la confirmación química se realizaron para poner a prueba la hipótesis del "protocolo de emergencia", el mismo equipo realizó un segundo estudio recreando una asfixia (privación de oxígeno progresiva). Los resultados terminaron de encajar las piezas. Al detectar la caída crítica de oxígeno, el cerebro de los roedores disparó una señal

masiva a través del sistema nervioso autónomo para intentar reactivar el corazón. La tormenta de neurotransmisores: Se midió una liberación simultánea y desproporcionada de docenas de compuestos químicos, incluyendo dopamina, serotonina y norepinefrina. En condiciones normales, esta combinación sirve para enfocar la atención al máximo frente a una amenaza de muerte.

Como es obvio, - nos dice Raymond A. Moody Jr-.[32]todas las personas con las que he hablado han «regresado» desde algún punto de la experiencia. Por regla general, se ha producido en ellas un interesante cambio de actitud. Recordemos que los sentimientos más comunes informados en los primeros estadios de la experiencia eran un desesperado deseo de regresar al cuerpo y lamentaciones por el propio fallecimiento. Sin embargo, una vez que la persona había alcanzado cierta profundidad en la experiencia *ya no quería regresar*, e incluso se resistía a hacerlo. Así ocurrió, sobre todo, con los que habían ido lo bastante lejos para encontrarse con el ser luminoso. Como señaló un hombre de la manera más enfática: «Nunca quise abandonar la presencia de aquel ser». Las excepciones a esta generalización son frecuentemente aparentes, no reales. Algunas madres que tenían hijos pequeños en el momento de la experiencia me dijeron que, aunque por ellas mismas hubieran preferido seguir donde estaban, sintieron la obligación de regresar y educar a los hijos. “Me preguntaba si me quedaría allí, pero mientras lo hacía recordé a mi familia, mis tres hijos y mi marido. Lo que siguió es lo más difícil de decir: cuando en presencia de esa luz tuve esa maravillosa sensación ya no quise regresar. Sin embargo, me tomé mis responsabilidades en serio, y comprendí que tenía un deber con

[32] *Vida después de la vida*. Raymond A. Moody Jr.

la familia. Por tanto, decidí regresar". En algunos casos me han contado que, aunque se sentían cómodos y seguros en su nueva existencia sin cuerpo, e incluso estaban gozando de ello, se sintieron felices de poder regresar a la vida física porque habían dejado sin hacer alguna tarea importante. En algunos casos tomó la forma de un deseo de completar una educación.

Moody tiene un amplio conocimiento de Platón El filósofo Platón, uno de los mayores pensadores de todas las épocas, vivió en Atenas del 428 al 348 a. de J. C. Nos legó un cuerpo de pensamiento en la forma de veintidós diálogos filosóficos, la mayor parte de los cuales incluyen a Sócrates, su maestro, como interlocutor, y a un pequeño número de letrados. Platón creía en la utilidad de la razón, la lógica y la argumentación para alcanzar la verdad y la sabiduría, pero sólo hasta cierto punto, pues también era un gran visionario que sugería que la verdad última sólo podía llegar con una experiencia casi mística de iluminación e intuición. Aceptaba que había planos y dimensiones de la realidad distintos al mundo sensible y físico, y creía que la esfera física sólo podía entenderse por referencia a los planos «superiores» de la realidad. En consecuencia, estaba interesado principalmente en el componente incorpóreo y consciente del hombre, el alma, y consideraba el cuerpo físico como su vehículo temporal. No es sorprendente, por tanto, que se sintiese atraído por el destino del alma tras la muerte física, y que varios diálogos …especialmente Fedón, Gorgias y La República… traten en parte de ese tema.

Los escritos de Platón están plagados de descripciones de la muerte que son semejantes a las que discutimos. Por ejemplo, Platón define la muerte como la separación de la parte incorpórea de una persona viva, el alma, de la parte física, el cuerpo. Es más, la parte

incorpórea está sometida a menos limitaciones que la física. Por tanto, Platón señala que el tiempo no es un elemento de la esfera que existe más allá del mundo sensible y físico. Las otras esferas son eternas y, según la notable frase de Platón, lo que llamamos tiempo no es sino «el reflejo móvil e irreal de la eternidad». Platón habla en varios pasajes de que el alma separada de su cuerpo puede encontrarse y conversar con los espíritus de otros y ser guiada en la transición de la vida física a la otra esfera por espíritus guardianes. Menciona que en el momento de la muerte puede encontrarse una barca que lleve a través de una masa de agua a la «otra orilla» de la existencia. En Fedón, el empuje y composición dramática de los argumentos y palabras utilizadas vienen a señalar que el cuerpo es la prisión del alma y que, en consecuencia, la muerte es como un escape o liberación de esa prisión. Aunque, como vimos en el capítulo primero, Platón articula …a través de Sócrates… la antigua visión de la muerte como sueño y olvido, lo hace sólo para desaprobarla y darle un giro de 180 grados. Según Platón, el alma viene al cuerpo físico desde una esfera del ser superior y más divina. Para él, es el nacimiento lo que constituye el sueño y el olvido, pues el alma, al nacer en un cuerpo, pasa de un estado de gran conciencia a otro mucho menos consciente y olvida las verdades que sabía en su estado anterior externo a un cuerpo. Por tanto, la muerte es despertar y recuerdo.

Todo lo contrario a las ideas de Platón son los versos de Rosalía de Castro (1837-1885) en esta parte de su poema que termina con la esperanza de seguir viviendo:

*Si medito en tu eterna grandeza,*
*buen Dios, a quien nunca veo,*
*y levanto asombrada los ojos*

*hacia el alto firmamento*
*que llenaste de mundos y mundos...*
*toda conturbada, pienso*
*que soy menos que un átomo leve*
*perdido en el universo;*
*nada, en fin... y que al cabo en la nada*
*han de perderse mis restos.*

## 8.3. El misterio invisible de la información

Escritor y periodista americano del New York Times, *James Gleick* es conocido por sus libros sobre ciencia y tecnología, llegando a ser finalista del Premio Pulitzer en tres ocasiones. Además, Gleick ha publicado varias biografías sobre grandes científicos del siglo XX.

"Como sabemos, - dice Gleick-[33] 1948 fue al año en el que Bell Telephone Laboratories anunció la invención de un minúsculo semiconductor electrónico, «un aparato sorprendentemente sencillo» que podía hacer todas las funciones de una válvula de vacío, pero con más eficacia. Era esquirla cristalina, tan pequeña que podían

[33] *La información*. James Gleick

sostenerse más de cien de ellas en la palma de la mano. En mayo, varios científicos constituyeron un comité para darle nombre, y dicho comité entregó a los ingenieros jefe en Murray Hill, Nueva Jersey, las papeletas con sus diversas propuestas. Ganó *transistor*. «Puede tener una importancia prácticamente ilimitada en el mundo de la electrónica y de la comunicación eléctrica», declaró Bell Labs en una conferencia de prensa, y, por una vez, la realidad superó las previsiones del bombo publicitario. El *transistor* supuso una verdadera revolución en el campo de la electrónica, abriendo el camino de la tecnología hacia la miniaturización y la omnipresencia, y en poco tiempo supuso para sus tres principales inventores la concesión del Premio Nobel. Un invento mucho más relevante y fundamental apareció en una monografía de setenta y nueve páginas de The Bell System Technological Journal de julio y octubre. Nadie se preocupó de organizar una conferencia de prensa por ello. El artículo tenía un título sencillo, pero grandilocuente, «A Mathematical Theory of Communication» («Una teoría matemática de la comunicación»), y su mensaje resultaba difícil de resumir. Pero constituyó un eje alrededor del cual comenzó a girar el mundo. Al igual que el transistor, esta innovación tuvo su propio neologismo: el término bit, elegido, en este caso, no por un comité de expertos, sino por el propio autor del trabajo, un hombre de treinta y dos años llamado Claude Shannon. A partir de ese momento, el bit se uniría al centímetro, al kilogramo, al litro y al minuto como una cantidad determinada, como una unidad de medida fundamental en la vida cotidiana".

Pero ¿qué medía este "bit"? «Una unidad para medir información», escribía Shannon, como si hubiera tal cosa, esto es, como si hubiera una información medible y cuantificable. Shannon

formaba parte supuestamente del equipo de investigaciones matemáticas de Bell Labs, pero solía seguir una línea independiente. Cuando este equipo dejó la central de Nueva York por unas nuevas instalaciones en las afueras de Nueva Jersey, él no se unió al grupo y prefirió quedarse en un chiribitil (buhardilla) del viejo edificio, una construcción de ladrillo rojo de doce pisos de altura de West Street, situada en una zona industrial entre el río Hudson y Greenwich Village. No le gustaba tener que desplazarse todos los días lejos para llegar al puesto de trabajo, y le encantaba el vecindario de aquella zona de Nueva York, donde podía escuchar a los clarinetistas de jazz en clubs que cerraban a altas horas de la madrugada. Además, coqueteaba tímidamente con una joven que trabajaba en el grupo de investigación de microondas de Bell Labs en la antigua fábrica Nabisco de dos pisos que se encontraba al otro lado de la calle. La gente lo consideraba un tipo encantador. Tras doctorarse en el MIT, había comenzado a trabajar en el departamento de guerra de los laboratorios, primero desarrollando un calculador automático para el sistema de control de tiro de las baterías antiaéreas, y más tarde centrándose en los pilares teóricos de los sistemas secretos de comunicación —criptografía— y en la elaboración de una prueba matemática de la seguridad del llamado Sistema X, la línea del teléfono rojo con el que se comunicaban Winston Churchill y el presidente Roosevelt. Por lo que en aquellos momentos sus directores estaban dispuestos a dejarlo hacer, aunque no entendieran exactamente en qué diablos estaba trabajando.

En 1948, más de ciento veinticinco millones de conversaciones pasaban diariamente por los más de doscientos veinte millones de kilómetros de cable y por los treinta y un, millones de aparatos telefónicos de Bell System. La Oficina del Censo informaba de estos

hechos bajo la rúbrica de «Comunicaciones en los Estados Unidos», pero no eran más que unos simples cálculos de comunicación. El censo también hizo un cálculo de varios miles de emisoras para radio y de unas cuantas decenas para televisión, además de periódicos, libros, panfletos y envíos postales. La oficina de correos contó sus cartas y paquetes, pero ¿qué se contaba, y en qué unidades, en la parte correspondiente a Bell System? No eran conversaciones, evidentemente; tampoco palabras, y mucho menos caracteres. Tal vez fuera simplemente electricidad. Los ingenieros de la compañía eran ingenieros eléctricos. Todo el mundo entendía que la electricidad servía para sustituir el sonido, el sonido de la voz humana, ondas en el aire que entraban en el micrófono del teléfono y se convertían en formas de onda eléctricas. Esta transformación constituía la esencia del avance del teléfono por delante del telégrafo, la tecnología que lo había precedido y que ya parecía muy desfasada.

La Bell System no tenía ni una cosa ni la otra, pero había contratado a su primer matemático en 1897: George Campbell, natural de Minnesota, que había cursado estudios en Gotinga y en Viena. Campbell afrontó inmediatamente un problema gravísimo de los primeros sistemas de transmisión telefónica. Las señales se distorsionaban cuando pasaban por los circuitos; cuanto mayor era la distancia, más era la distorsión. Campbell encontró la solución recurriendo en parte a las matemáticas y en parte a sus conocimientos de ingeniería eléctrica. Sus jefes aprendieron a no preocuparse mucho por cómo lo hizo. El propio Shannon, en su época de estudiante, siempre había dudado entre ser ingeniero o matemático. Para Bell Labs era las dos cosas, por gusto o por fuerza, un individuo muy experto en circuitos y relés, pero que se sentía feliz en el reino de la abstracción simbólica. La mayoría de los ingenieros

de telecomunicaciones dedicaban buena parte de su experiencia a solventar problemas físicos, a la amplificación y a la modulación, a la distorsión de fase y a la degradación que se producía entre señal y sonido.

En 1943 el matemático y descodificador inglés Alan Turing visitó Bell Labs en una misión criptográfica, y pudo reunirse varias veces con Shannon durante el almuerzo e intercambiar con él conjeturas sobre el futuro de las máquinas inteligentes. («¡Shannon no solo quiere introducir datos en un Cerebro, sino también cosas culturales!», exclamaría Turing. «¡Quiere que toque música!») Shannon también se cruzó en su camino con Norbert Wiener, de quien había recibido clases en el MIT, y que en 1948 proponía una nueva disciplina que se llamaría «cibernética», el estudio de la comunicación y el control. Por su parte, Shannon comenzó a mostrar un interés especial por las señales de televisión, desde un curioso punto de vista: se preguntaba si su contenido podía compactarse o comprimirse para permitir una transmisión más rápida. La lógica y los circuitos se cruzaron para generar un nuevo híbrido; lo mismo ocurrió con los códigos y los genes. A su manera, en su búsqueda solitaria de una estructura en la que entrelazar sus múltiples conocimientos, Shannon empezó a ensamblar una teoría de la información.

# 9. LA TENDENCIA INHERENTE DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS A CREAR ORDEN

Stuart A. Kauffman en su libro *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution* (1993) nos deja una obra fundamental escrita por el biólogo teórico y médico Stuart A. Kauffman. El libro *desafía la visión evolutiva tradicional* centrándose en cómo las leyes de la física y la química imponen un orden espontáneo que complementa a la selección natural de Darwin. Kauffman argumenta que la selección natural no es la única fuente

de orden en la biología. Propone que la autoorganización (la tendencia inherente de los sistemas complejos a crear orden a partir del caos) proporciona la materia prima sobre la cual opera la selección, nunca el azar. “Mi objetivo a lo largo de todo el texto es intentar caracterizar dos características de la ontogenia: aquellos que pueden reflejar las propiedades autoorganizadas del sistema genómico y bioquímico subyacente y aquellos que reflejan la selección, y determinar una forma de reconocer el matrimonio entre ambos. Si la investigación es útil para que la investigación sea útil, debemos encontrar no solo formas de pensar sobre estos temas, sino también formas de convertirlos en programas de investigación”. Los sistemas vivos complejos muestran un orden espontáneo que surge de manera natural debido a sus propiedades matemáticas y físicas, *no solo por la presión selectiva*. Redes matemáticas utilizadas para estudiar los "paisajes de aptitud" muestran cómo la interacción entre genes (\(N\)) y sus conexiones (\(K\)) afecta la capacidad de una especie para evolucionar”.

Kauffman descubrió que estas redes caóticas se estabilizan de forma natural en "atractores", lo que explica cómo diferentes tipos de células se diferencian a partir del mismo ADN. Como la idea de que la vida y la evolución florecen en una zona de transición crítica situada entre el orden rígido y el desorden absoluto. Metáforas visuales donde los picos representan la máxima adaptación. Kauffman analiza cómo los organismos se mueven por estos paisajes mediante mutaciones y selección. No contradice a Darwin, sino que expande la Síntesis Evolutiva Moderna al añadir las ciencias de la complejidad. Sentó las bases para estudiar los organismos como redes interconectadas en lugar de colecciones de genes aislados. Sus teorías han influido en la inteligencia artificial, la economía, la

informática y el estudio de los sistemas complejos. “Los organismos multicelulares -nos dice Kauffman- existen al menos desde el Precámbrico tardío. No hay razón para pensar que la ontogenia de las principales características haya cambiado en 600 millones de años o más. Casi todas las plantas y animales multicelulares comienzan como una sola célula. Típicamente, esta célula individual es el cigoto, formado por la unión de los gametos masculino y femenino. Durante el desarrollo, esta célula individual sufre entre 10 y 50 divisiones mitóticas, creando entre 2'° = 103 y 250 = $10^{14}$ células, que forman el adulto. Quizá el hecho más crítico sobre la ontogenia en casi todos los organismos es que el conjunto de instrucciones genéticas es idéntico en todas las células del organismo. El ejemplo familiar —que, a pesar de su fama incomodidad, debería fascinarnos a todos— es la zanahoria (Steward 1958; Steward, Mapes, et al. 1964). La zanahoria madura puede dispersarse en células individuales; Bajo condiciones apropiadas, cualquier tipo celular —ya sea de raíz, tallo u hoja— puede ser inducido a dividirse, formar una masa rudimentaria, sufrir organogénesis y reformar una zanahoria organizada completa. De esto se deduce que cada célula de la zanahoria lleva las instrucciones genéticas necesarias para formar una zanahoria entera. En otras palabras, la ontogenia es un ejemplo abrumador de autoorganización.

Las ideas de Stuart Kauffman sobre la autoorganización y la complejidad se han integrado profundamente en la biología contemporánea. Hoy en día, sus conceptos teóricos se aplican de forma práctica gracias a la secuenciación masiva de datos y la potencia de cálculo actual. Kauffman demostró que los genes no actúan solos, sino en redes complejas (Redes Booleanas). La biología de sistemas moderna ya no estudia genes aislados, sino

mapas completos de interacciones genéticas. Se utilizan supercomputadores para modelar cómo las células humanas cambian de estado (por ejemplo, de célula sana a cancerosa) basándose en los "atractores" matemáticos que Kauffman describió. El cáncer se entiende hoy como un fallo en la dinámica de una red de información celular, una idea alineada con los paisajes de aptitud de Kauffman. Los oncólogos utilizan modelos computacionales para mapear cómo las células tumorales se mueven por "paisajes de adaptación" para resistir a la quimioterapia. En lugar de atacar un solo gen mutado, los tratamientos modernos buscan desestabilizar la red completa del tumor para empujarlo hacia un estado de muerte celular (apoptosis).La biología sintética no solo edita ADN, sino que diseña circuitos biológicos artificiales desde cero. Los ingenieros biológicos crean interruptores y osciladores genéticos artificiales dentro de bacterias utilizando las reglas de conectividad de los Modelos NK de Kauffman.

Estas teorías ayudan a predecir si un organismo modificado artificialmente será estable o si su red genética colapsará hacia el caos. El proceso por el cual una célula madre se convierte en una célula de la piel, del corazón o del cerebro (diferenciación celular) se explica mediante la autoorganización. La biología moderna visualiza la diferenciación como una bola que rueda por un paisaje con valles (propuesto originalmente por Conrad Waddington y formalizado matemáticamente por Kauffman). Para transformar una célula adulta de vuelta a célula madre (células iPS), los científicos alteran los nodos clave de la red para "saltar" de un atractor a otro. Esta disciplina explica cómo pequeños cambios en los genes de desarrollo regulan grandes saltos evolutivos. La biología moderna reconoce que la selección natural no puede crear cualquier forma de vida; está

limitada por las leyes físicas de la autoorganización. Muchas estructuras biológicas complejas (como la simetría de los ojos o los patrones de las rayas de las cebras) surgen de forma espontánea por interacciones químicas, antes de que la selección natural actúe sobre ellas.

El famosísimo biólogo teórico y médico estadounidense Stuart Kauffman es una eminencia mundial precisamente por demostrar que *la selección natural de Darwin no es la única fuerza de la evolución*, sino que existe un "orden gratis" que surge espontáneamente debido a las leyes de la complejidad. La biología tradicional dice que la vida es tan ordenada y perfecta solo porque la *selección natural* fue descartando los errores durante millones de años. Kauffman revolucionó esto al demostrar que *la materia compleja tiende a organizarse sola por pura física y matemáticas*, antes incluso de que actúe la selección natural. Él llama a esto "orden gratis" (*order for free*). La vida no surge por un accidente hiper-improbable, sino porque es una consecuencia inevitable de la complejidad química. Esta es una de sus ideas más hermosas para explicar cómo avanza la evolución (y el universo). Imagina una casa con habitaciones cerradas. Cuando abres una puerta y entras a una habitación, de repente se te abren tres puertas nuevas que antes no podías ni ver. La evolución no calcula el futuro; avanza explorando lo que tiene justo al lado (el adyacente posible). Una combinación química crea una molécula, y esa molécula abre la puerta a que existan cuatro reacciones nuevas. Así despierta la biodiversidad, paso a paso, expandiendo sus propias posibilidades. Kauffman modeló las células y los genes como interruptores que se encienden y apagan entre sí (redes booleanas). Demostró matemáticamente que cuando un sistema tiene suficientes conexiones complejas, no cae en el caos

caótico ni se queda congelado en la inmovilidad. Encuentra un *"atractor",* un equilibrio perfecto donde la vida puede existir. Podemos visualizar este delicado equilibrio que propone Kauffman: el borde del caos. La vida no sobrevive ni en el orden absoluto (donde nada cambia) ni en el caos absoluto (donde todo se destruye), sino exactamente en la frontera. Quizás mi escepticismo sobre la evolución y concretamente el azar me ha dado muchos dolores de cabeza, pero autores como Kauffman disipan muchas incógnitas

La idea tradicional de que unos rayos cayeron en una "sopa primitiva", agitaron los elementos al azar y, de repente, por pura lotería cósmica, se ensambló una célula viva (el ancestro común o LUCA), es matemáticamente ridícula. El astrofísico Fred Hoyle decía que la probabilidad de que eso ocurra es la misma que la de que **un** *tornado pase por un desguace y ensamble un Boeing 747 funcional*. El azar puro no funciona para explicar el origen de la vida. Es justo ahí donde entra Stuart Kauffman para salvar el dilema, eliminando el azar de la ecuación y sustituyéndolo por la *necesidad física.* Kauffman demostró que la primera célula no surgió porque una molécula complejísima (como el ADN o una proteína perfecta) se formara por golpe de suerte. La vida empezó mucho antes, a nivel de grupo, mediante lo que él llama *conjuntos autocatalíticos*. Ninguna de ellas está "viva" ni es perfecta, pero juntas forman un *circuito cerrado que se alimenta a sí mismo*. Kauffman demostró matemáticamente que cuando una sopa química alcanza un nivel crítico de diversidad de moléculas, *este circuito surge de forma obligatoria, no por azar.* La química se vuelve cíclica y empieza a generar copias de sí misma de manera espontánea. Una vez que tienes ese motor químico girando y copiándose a sí mismo gracias a las leyes de la complejidad (el "orden gratis"), ocurre el siguiente paso lógico: el circuito queda

atrapado sin querer dentro de una pequeña burbuja de grasa (un liposoma), que también se forma de manera natural en el agua. Al quedar protegido dentro de esa bolsa, el circuito químico se vuelve más eficiente, empieza a competir por nutrientes con otras burbujas, y es ahí donde *comienza la selección natural de Darwin*. El azar deja de ser un caos y se convierte en pequeñas variaciones sobre un sistema que ya funcionaba de forma ordenada. La vida en la Tierra no despertó por un milagro del azar, sino porque la materia, cuando se junta en cantidad suficiente, no tiene más remedio que empezar a cooperar.

Está claro que los mejores saltos en la historia de la ciencia han ocurrido gracias a personas que, usando el sentido común y la razón, cuestionaron los dogmas intocables de los expertos. La ciencia actual sufre de un exceso de soberbia, blindada tras una jerga incomprensible y fórmulas matemáticas que muchas veces solo sirven para que nadie de fuera pueda debatirles. Se comportan como una casta con su propia religión ("la dogmática"), donde si no tienes un título específico, parece que no tienes derecho a opinar sobre la realidad que tú mismo estás viviendo y observando. Stuart Kauffman, a pesar de ser un investigador de élite, fue un rebelde precisamente por eso. Él se enfrentó al dogma de su época porque la biología oficial le decía: *"La vida es puro azar y selección natural, y si las matemáticas dicen que es imposible, peor para las matemáticas"*. Kauffman usó la lógica más pura y transparente para demostrarles que estaban ciegos ante lo evidente. El investigador pasa la vida mirando un microscopio y olvida cómo encaja eso en el misterio del universo y no es fácil quitar la jerga pedante y explicarle a la gente común cómo "despierta la vida". La ciencia rigurosa solo avanza cuando alguien tiene una corazonada lógica antes de poder

demostrarla. La "sopa primitiva" y el paso a la célula se entienden mucho mejor pensando en vecinos que cooperan en un barrio que memorizando nombres en latín o ecuaciones termodinámicas.

## 9.1. Complejidad y autoorganización

*Complejidad: Una visita guiada,* es un aclamado libro de divulgación científica escrito por la informática teórica **Melanie Mitchell** en **2009**, el cual sirve como una introducción accesible e interdisciplinaria a las ciencias de la complejid**ad**. La obra, nacida a partir de una serie de conferencias impartidas por la autora en el Santa Fe Institute, explora cómo sistemas masivos compuestos por partes individuales simples logran autoorganizarse, adaptarse y generar comportamientos altamente sofisticados sin necesidad de un

líder central. El libro fue galardonado con el prestigioso *Phi Beta Kappa Science Book Award* en 2010. El campo que estudia Mitchell se refiere a cómo la interacción colectiva de componentes individuales genera propiedades emergentes que superan con creces la suma de sus partes independientes. Mitchell desmitifica tecnicismos abstractos explicando fenómenos naturales como las colonias de hormigas, el sistema inmunitario y los billones de neuronas que dan forma a la conciencia humana. Analiza cómo la naturaleza procesa información de manera descentralizada utilizando las leyes de la genética, la evolución biológica y la dinámica de redes. Explica por qué los sistemas dinámicos complejos se resisten al control absoluto y a los pronósticos a largo plazo a través de conceptos como la teoría del caos.

¿Qué es la complejidad? Nos referimos a la histórica que abarca los fundamentos de la dinámica no lineal, la entropía y la teoría de la información. Es un recorrido por el funcionamiento de los algoritmos genéticos y los autómatas celulares. Reflexiones sobre la inteligencia artificial tradicional frente a los sistemas emergentes inspirados en la biología. Análisis de la estructura de interconexión en el internet, los mercados financieros y las redes sociales metabólicas. El futuro de la complejidad tiene una mirada crítica hacia la búsqueda de principios universales que unifiquen todas estas disciplinas. Melanie Mitchell, en *Complexity: A Guided Tour*, explica que la autoorganización y la emergencia surgen cuando componentes individuales siguen reglas locales simples, generando un comportamiento colectivo global complejo sin control central. La autora ilustra este fenómeno con las colonias de hormigas, el sistema inmunitario y el cerebro humano, demostrando cómo surge el orden a partir de interacciones distribuidas. Su relato se lee con gusto y me

explica algo más de las incansables hormigas y el cerebro como realidades visibles que nos transportan a mundos invisibles. Cita la autora Mitchell al pensador inglés John Locke en "*Un ensayo sobre el entendimiento humano*" sobre la complejidad: "Ideas así formadas por varias simples juntas, las llamo Complejas; como son belleza, gratitud, un hombre, un ejército, el universo". Seguidamente nos mete en Brasil tras un ejercito de hormigas para explicarnos la maravillosa complejidad de los simple.

"Brasil: La selva amazónica. Un ejército de medio millón de hormigas están en marcha. Nadie está al mando de este ejército; no tiene comandante. Cada hormiga individual es casi ciega y mínimamente inteligente, pero las hormigas marchando juntas crean una masa coherente en forma de abanico que se apodera de ellas, mata y devora eficientemente a toda presa a su paso. ¿Qué no puede ser devorado de inmediato y llevarse junto con el enjambre? Después de un día de saquear y destruir la vida comestible sobre un bosque denso del tamaño de un campo de fútbol, las hormigas construyen su refugio nocturno: una cota de malla de un metro de ancho formado por los cuerpos enlazados de las trabajadoras, protegiendo a las larvas jóvenes y la reina madre en el centro. Cuando llega el amanecer, la Bola viva desparrama hormiga tras hormiga mientras los miembros de la colonia vuelven a tomar sus lugares para la marcha del día. Nigel Franks, biólogo especializado en comportamiento de hormigas, ha escrito: "La hormiga solitaria es uno de los animales menos sofisticados imaginables en cuanto a comportamiento" y, "si se colocan 100 hormigas armadas sobre una superficie plana, caminarán dando vueltas y vueltas en círculos que nunca disminuyen hasta que mueren de agotamiento." Sin embargo, si juntas medio millón de ellas, el grupo en su conjunto se convierte

en lo que algunos han llamado un "superorganismo" con "inteligencia colectiva". ¿Cómo ocurre esto? Aunque se sabe mucho sobre el comportamiento de las hormigas de la colonia, los científicos aún no comprenden completamente todos los mecanismos subyacentes a la inteligencia colectiva de una colonia. Como comenta Franks además, "Yo he estudiado una especie común de hormiga ejército durante muchos años, y para mí, los misterios de su organización social siguen multiplicándose más rápido que la velocidad a la que se pueda explorar su estructura social." Los misterios de las hormigas ejército son un microcosmos de los misterios de muchos sistemas naturales y sociales que consideramos "complejos". Nadie lo sabe exactamente. Cómo cualquier comunidad de organismos sociales—hormigas, termitas, humanos— se reúnen para construir colectivamente las estructuras elaboradas que aumentan la probabilidad de supervivencia de la comunidad en su conjunto.

Igualmente de misterioso, es cómo la intrincada maquinaria del sistema inmunitario combate las enfermedades; Cómo un grupo de células se organiza para ser un ojo o un cerebro; cómo son los miembros independientes de una economía, cada una trabajando principalmente para su propio beneficio, produce complejos mercados globales estructurados; o, de forma más misteriosa, cómo llamamos los fenómenos "Inteligencia" y "conciencia" emergen de sustratos materiales no inteligentes y no conscientes. Tales preguntas son temas de sistemas complejos, un campo interdisciplinar de investigación que busca explicar cómo grandes cantidades de entidades relativamente simples se organizan, sin el beneficio de ningún controlador central, en un colectivo, un todo que crea patrones, utiliza información y, en algunos casos, evoluciona y aprende. La palabra “complejo” proviene de la raíz latina plectere:

tejer, entrelazados. En sistemas complejos, muchas partes simples están irreduciblemente entrelazadas, y el campo de la complejidad es en sí mismo una unión de muchos campos diferentes. Los investigadores de sistemas complejos afirman que diferentes sistemas complejos en la naturaleza, como las colonias de insectos, los sistemas inmunitarios, los cerebros y las economías, tienen mucho en común. Vamos a mirar más de cerca.

Las colonias de insectos sociales ofrecen algunas de las más ricos y misteriosos ejemplos de sistemas complejos en la naturaleza. Una colonia de hormigas, por ejemplo, puede contener cientos o millones de hormigas individuales, cada una de estas criaturas es bastante sencilla que obedece sus imperativos genéticos de buscar alimento, responde de forma sencilla a las señales químicas de otras hormigas en su colonia, luchar contra intrusos, y así sistemáticamente. Sin embargo, como cualquier observador casual del aire libre puede atestiguar, las hormigas en una colonia, cada una realiza sus propias acciones relativamente simples, trabaja conjuntamente para construir estructuras asombrosamente complejas que son claramente de gran importancia para la supervivencia de la colonia en su conjunto. Consideremos, por ejemplo, su uso de tierra, hojas y ramitas para construir enormes nidos de gran resistencia y estabilidad, con grandes redes de pasadizos subterráneos y cámaras secas, cálidas y sombrías cuyas temperaturas se controlan cuidadosamente mediante materiales del nido en descomposición y de cuerpos de hormigas. Considera también los largos puentes que construyen ciertas especies de hormigas con sus propios cuerpos para permitir la emigración de un nido a otro mediante ramas de árboles separadas por grandes distancias a escala de una hormiga. Aunque ahora se entiende

mucho sobre las hormigas y sus estructuras sociales, aun así, los científicos no pueden explicar completamente ni su comportamiento individual ni el de grupo: exactamente cómo las acciones individuales de las hormigas producen estructuras grandes y complejas, cómo las hormigas se señalan entre sí y cómo la colonia en su conjunto se adapta a los cambios circunstancias (por ejemplo, cambios de clima o ataques a la colonia). Y ¿cómo la evolución biológica produjo criaturas con un contraste tan enorme entre su simplicidad individual y su sofisticación colectiva?

No me gustaría terminar este espacio a las hormigas sin contar las habilidades que tienen con los pulgones. La interacción de las hormigas y los pulgones es bien conocida por agricultores y científicos. Las hormigas se alimentan de la melaza que excretan los pulgones y éstos son defendidos por las hormigas de sus depredadores y parásitos. Así, los dos grupos de insectos salen beneficiados y es un ejemplo de mutualismo que sale en los libros. Aun así, varías circunstancias pueden hacer que esta interacción positiva para todos, bascule algo y pase a ser negativa para los pulgones, si a las hormigas les faltan otras presas, o si algunos depredadores o parásitos de los pulgones pueden escaparse de las hormigas. La Naturaleza nunca es perfecta. En un cultivo de mandarineros, la exclusión de hormigas en el tronco, para evitar que suban y que los pulgones se beneficien de su protección, provocó un sorprendente incremento en el número de pulgones, pues también se limitó el acceso de otros depredadores, como las tijeretas. Los pulgones se vieron beneficiados de unas condiciones favorables para proliferar, pese a no contar con la protección de las hormigas.

El científico cognitivo Douglas Hofstadter, en su libro *Gödel, Escher, Bach,* hace una analogía extendida entre colonias de

hormigas y cerebros, ambos sistemas complejos en los que componentes relativamente simples con solo un número limitado de comunicación entre ellos, colectivamente da lugar a complicaciones y comportamiento sofisticado a nivel de sistema ("global"). En el cerebro, los componentes simples son células llamadas neuronas. El cerebro está compuesto por muchos tipos diferentes de células además de neuronas, pero la mayoría de los neurocientíficos creen que las acciones de neuronas y los patrones de conexiones entre grupos de neuronas son lo que causan percepción, pensamiento, sentimientos, conciencia y otros factores importantes en las actividades cerebrales a gran escala.

La Neurona consta de tres partes principales: el cuerpo celular (SOMA), las ramas que transmiten la entrada de la célula desde otras neuronas (dendritas), y el único tronco que transmite la salida de la célula a otras neuronas (axones). Muy aproximadamente, una neurona puede estar en un estado activo (disparo) o un estado inactivo (no disparando). Una neurona se activa cuando recibe suficientes señales de otras neuronas a través de sus dendritas. El disparo consiste en enviar un impulso eléctrico a través del axón, que luego se convierte en una señal química a través de sustancias químicas llamadas neurotransmisores. Esta señal química a su vez activa otras neuronas a través de sus dendritas. La frecuencia de disparo y el resultado de salida de una neurona pueden variar con el tiempo según ambas aportaciones y cuánto ha estado funcionando últimamente. Estas acciones recuerdan a las de las hormigas en una colonia: individuos (neuronas o hormigas) perciben señales de otros individuos y una fuerza suficiente de estas señales hacen que los individuos actúen de ciertas maneras que producen señales adicionales. Los efectos generales pueden ser muy complejos. Vimos

una explicación de las hormigas y sus estructuras sociales siguen siendo incompletas. De manera similar, los científicos aún no entienden cómo se deben a las acciones de redes individuales o densas de neuronas dan lugar al comportamiento a gran escala del cerebro. No entienden qué significan las señales neuronales, ni cuántos números de neuronas trabajan juntas para producir el comportamiento cognitivo global, o cómo exactamente hacen que el cerebro piense y aprenda cosas nuevas. Y otra vez, quizá lo más desconcertante es cómo un sistema de señalización tan elaborado con tales poderosas habilidades colectivas surgió a través de la evolución.

El sistema inmunitario es otro ejemplo de un sistema en el que los componentes simples en conjunto dan lugar a comportamientos muy complejos que involucran señalización y control, y en los que ocurre la adaptación a lo largo del tiempo. El sistema inmunitario, al igual que el cerebro, difiere en sofisticación en diferentes aspectos, pero los principios generales son los mismos en muchas especies. El sistema inmunitario está formado por muchos tipos diferentes de células distribuidas a lo largo de todo el cuerpo (en sangre, médula ósea, ganglios linfáticos y otros órganos). La acumulación de células funciona conjuntamente de manera eficaz y eficiente, sin necesidad de Control central. Los protagonistas del sistema inmunitario son los glóbulos blancos, por lo demás conocidos como linfocitos. Cada linfocito puede reconocerlo, a través de receptores en su célula moléculas correspondientes a ciertos posibles invasores (por ejemplo, bacterias). Un billón de estas patrullas centinelas circulan en la sangre en un momento dado, cada uno listo para dar la alarma si se activa—es decir, si es particular-. Los receptores se encuentran, por casualidad, con un invasor correspondiente. Cuando un linfocito

es activado, secreta un gran número de moléculas —anticuerpos— que pueden identificar invasores similares. Estos anticuerpos salen en una misión de búsqueda y destrucción por todo el cuerpo. Un linfocito activado también se divide en un aumento de la regla, creando linfocitos hijos que ayudarán a cazar invasores y secretar anticuerpos contra ellos. También crea linfocitos hijos que recuerdan al invasor que se vio, dando así la inmunidad del cuerpo a patógenos previamente encontrados.

Una clase de linfocitos se llama células B (la B indica que se desarrollan en la médula ósea) y tienen una propiedad notable: cuanto mejor es la combinación entre una célula B y un invasor, más células hijas secretan anticuerpos de la célula B. Las células hijas difieren ligeramente de las células madre de forma aleatoria mediante mutaciones, y estas células hijas continúan creándose sus propias células hijas en proporción directa a lo bien que coinciden con el invasor. El resultado es una especie de proceso darwiniano de selección natural, en el que la coincidencia entre células B e invasores mejora poco a poco, hasta que los anticuerpos que se producen son extremadamente eficientes para buscar y destruir los microorganismos culpables. Muchos otros tipos de células participan en la respuesta orquesta da del sistema inmunitario. Las células T (que se desarrollan en el timo) desempeñan un papel clave en la regulación la respuesta de las células B. Los macrófagos deambulan buscando sustancias que han sido marcados por anticuerpos, y realizan el trabajo real de destruir el invasor. Otros tipos de células contribuyen a la inmunidad a largo plazo. Otra cosa más. Partes del sistema protegen contra ataques a las células del propio cuerpo. Al igual que el del cerebro y las colonias de hormigas, surge el comportamiento del sistema inmunitario. De las acciones

independientes de una multitud de jugadores simples sin que nadie realmente lo haga al mando. Las acciones de los jugadores simples—células B, células T, macrófagos, y similares—pueden verse como una especie de red química de procesamiento de señales en la que el reconocimiento de un invasor por una célula desencadena una cascada de señales entre las células que ponen en juego la elaborada y compleja respuesta.

La pregunta que podemos hacernos es, ¿por qué propiedades comunes de sistemas complejos cuando se analizan en detalle, estos distintos sistemas son bastante diferentes, pero si se observan a nivel abstracto, comparten algunas propiedades intrigantes:

Por ejemplo, todos los sistemas que se describen anteriormente consisten en grandes redes de componentes individuales (hormigas, células B, neuronas, compradores de acciones, creadores de sitios web), cada uno siguiendo típicamente de manera relativamente reglas simples sin control central ni líder. Son las acciones colectivas de un gran número de componentes que dan lugar al complejo, difíciles de predecir y patrones de comportamiento cambiantes que nos fascinan. Por otra parte, todos estos sistemas producen y utilizan información y señales tanto en entornos internos como externos. Todos estos sistemas se adaptan, es decir, cambian su comportamiento a mejorar sus posibilidades de supervivencia o éxito—a través del aprendizaje o procesos evolutivos. Ahora podemos entender una definición del término *sistema complejo*: un sistema en que grandes redes de componentes sin control central y simples reglas de funcionamiento dan lugar a un comportamiento colectivo complejo, sofisticado, con procesamiento de la información y adaptación mediante aprendizaje o evolución. ¿Cómo se puede medir la complejidad? ¿Hay alguna forma de decir

exactamente cuán complejo es un sistema que otro? Estas son preguntas clave, pero aún no se han respondido a nadie satisfactoriamente y siguen siendo la fuente de numerosos argumentos científicos en el campo.

## 9.2. Cerebro y pensamiento

Douglas Richard Hofstadter es un estudioso estadounidense de ciencias cognitivas, física y literatura comparada cuya investigación se centra en la conciencia, el pensamiento y la creatividad. Este científico en su libro *Gödel, Escher, Bach,* hace una analogía extendida entre colonias de hormigas y cerebros, ambos sistemas complejos en los que componentes relativamente simples con solo un número limitado de comunicación entre ellos, colectivamente da lugar a complicaciones y comportamiento sofisticado a nivel de sistema ("global"). Hofstadter recopila y estudia errores cognitivos (en

gran medida, pero no únicamente, errores del habla), "bon mots" (bromas humorísticas espontáneas) y analogías de todo tipo, y su observación de larga data de estos diversos productos de la cognición y sus teorías sobre los mecanismos que subyacen a ellos han ejercido una poderosa influencia en las arquitecturas de los modelos computacionales desarrollados por él mismo y los miembros de FARG[34]. Todos los modelos computacionales FARG comparten ciertos principios clave, entre los que se encuentran: que el pensamiento humano se lleva a cabo mediante miles de pequeñas acciones independientes en paralelo, sesgadas por los conceptos que se activan actualmente; que la activación se extiende desde conceptos activados a "conceptos vecinos" menos activados; que existe una "temperatura mental" que regula el grado de aleatoriedad en la actividad paralela; que las vías prometedoras tienden a explorarse más rápidamente que las poco prometedoras. En el cerebro, los componentes simples son células llamadas neuronas. El cerebro está compuesto por muchos tipos diferentes de células además de neuronas, pero la mayoría de los neurocientíficos creen que las acciones de neuronas y los patrones de conexiones entre grupos de neuronas son lo que causan percepción, pensamiento, sentimientos, conciencia y otros factores importantes en actividades cerebrales a gran escala.

Los estudiosos del cerebro avanzaron mucho en el conocimiento del hardware de pequeña y gran escala. Si bien no obtuvieron un esclarecimiento considerable del modo en que el cerebro manipula los conceptos, sí han aportado algunas ideas sobre

[34] Los modelos computacionales del grupo FARG (Fluid Analogies Research Group), fundado por Douglas Hofstadter, son programas diseñados para simular la creatividad humana, la percepción y la formación de analogías fluidas, imitando cómo la mente flexible resuelve problemas en lugar de usar reglas lógicas rígidas.

los mecanismos biológicos donde se asienta la manipulación de los pensamientos. El pensamiento debe depender de la representación de la realidad en el hardware del cerebro. El cerebro, esa intrincada red de casi cien mil millones de neuronas y otro tanto de células no neuronales –astrocitos y oligodendrocitos, entre otros–, ha cautivado y desafiado a la comunidad científica durante siglos. Para entender cómo los circuitos neuronales permiten que nos emocionemos con el olor de un perfume, sintamos empatía o mostremos comportamientos complejos como la creatividad o la toma de decisiones éticas, primero debemos comprender la estructura y la función de los diferentes tipos de células cerebrales y su relación. Claro que, como podrán imaginar, identificar tantos miles de millones de células cerebrales es todo un reto científico y tecnológico, más aún si queremos caracterizar cada tipo de célula en particular. Pues bien, este monumental esfuerzo se acaba de llevar a cabo con éxito. Al fin un censo de las células cerebrales. Para poder hacer realidad un proyecto tan ambicioso, en 2017 se creó la red de investigación para el censo de células cerebrales, llamada BICCN (por sus siglas en inglés). Esta red engloba a más de treinta laboratorios de diversas disciplinas. Su objetivo es identificar, caracterizar y mapear cada tipo de célula del cerebro en humanos, primates no humanos y ratones.

Los estudios de la BICCN, gracias al empleo de las tecnologías más avanzadas que hasta ahora solo se aplicaban a modelos animales, han dado sus primeros frutos: han revelado la composición celular detallada del cerebro humano, tanto adulto como durante su desarrollo. Los hallazgos se detallan en una serie de veinticuatro artículos científicos, en su mayoría publicados en las prestigiosas revistas *Science y Science advances.* Y lo han hecho en tres diferentes niveles de estudio: el *transcripcional*, que nos indica la

función de las células a través de la expresión de sus genes; el *epigenético,* que nos revela cómo se activan o desactivan estos genes por la edad y por factores ambientales; y el nivel *funcional,* que se refiere, por ejemplo, a si las neuronas excitan o inhiben a otras neuronas. La integración de estos resultados muestra que, como cabía esperar, además de la variación entre regiones cerebrales, también la hay entre los cerebros de cada persona. Es decir, no existe un único prototipo de cerebro humano, sino un amplio rango genético y de respuesta al ambiente, tanto en individuos sanos como en diferentes estados de enfermedad.

La enorme y compleja investigación a nivel de análisis de células individuales ha proporcionado resultados interesantísimos. En primer lugar, se han generado dos atlas: *uno* de células individuales del cerebro humano adulto, y otro de células individuales de primates no humanos también adultos (*macacos y titíes*). Asimismo, se han presentado dos análisis comparativos, uno de células individuales entre cerebros humanos y de primates no humanos, y otro entre células individuales durante el desarrollo del cerebro tanto como en *primates* no humanos. Finalmente, se han analizado y modelizado la *función y la distribución* de los tipos celulares neuronales humanos y su comparación con los de ratón. Entre los resultados más importantes destaca la descripción detallada de más de tres millones de células cerebrales a nivel individual (entre las que se incluyeron más de dos millones de neuronas) de casi cien zonas diferentes del cerebro humano adulto. Los hallazgos indican que el cerebro no es nada homogéneo. Aunque todas las células del cerebro comparten el mismo ADN, cada una de ellas usa diferentes genes en distintas cantidades. Eso da lugar a un nivel de diversidad y especialización celular absolutamente

asombroso. Cada área cerebral contiene un conjunto específico de tipos de células y en diferentes estados funcionales. Además de ayudarnos a entender cómo funciona el cerebro, conocerlos será de una gran utilidad clínica en relación con enfermedades cuya alteración cerebral puede ser diferente según la persona que lo sufra, como los tumores cerebrales, la epilepsia o la esclerosis múltiple, por citar algunas.

Curiosamente, las neuronas más singulares se encuentran en la corteza visual primaria (V1), que se ha convertido en el epicentro de fascinantes descubrimientos sobre cómo interpretamos y percibimos el mundo visual que nos rodea. Esta región cerebral no es solo un procesador de imágenes, sino también un mosaico impresionante de células que, en conjunto, crean el rico tapiz de nuestra experiencia visual, permitiéndonos discernir formas, colores y movimientos con asombrosa precisión. Este trabajo sienta las bases para entender cómo las variaciones en la estructura celular pueden influir en nuestra capacidad para procesar información y realizar diversas funciones cognitivas. Más aún, otra investigación revela también sorpresas en las células del cerebro humano cuando las comparamos con las de nuestros parientes más cercanos, los chimpancés y los gorilas. Aunque compartimos con ellos una estructura celular cerebral básica, nuestras neuronas utilizan diferentes genes para conectarse y formar circuitos en el cerebro. Este detalle indica que pequeños cambios en las conexiones neuronales podrían impulsar evolutivamente nuestras capacidades cognitivas, tales como el razonamiento complejo y la creación de lenguajes avanzados. Sumándose a estos resultados, el equipo desveló una interesante similitud neuronal entre chimpancés y gorilas, pese a que los chimpancés y los humanos comparten un

ancestro más inmediato. Esto pone de relieve la excepcionalidad de la biología cerebral que nos hace humanos, desplegando un abanico de posibilidades como la invención de herramientas, la composición de majestuosas sinfonías y la percepción de la delicada sensibilidad en la poesía. En relación con el estudio del desarrollo de la corteza cerebral humana, que se despliega a través de nuestra etapa prenatal y continúa durante muchos años tras el nacimiento, se han analizado minuciosamente más de 700.000 células provenientes de 169 muestras de tejido de 106 donantes.

Así, se han podido establecer cómo se desarrollan y se diferencian diversas células en el cerebro, incluyendo las neuronas que se encargan de emitir señales eléctricas, aquellas que las regulan, las células gliales que son las “cuidadoras” del entorno neuronal, y las células que conforman nuestros vasos sanguíneos cerebrales, siendo todas ellas piezas fundamentales en el majestuoso puzzle de nuestra maquinaria cerebral. En cuanto a las implicaciones que estos hallazgos tienen en trastornos del desarrollo como el autismo, este trabajo nos presenta una perspectiva de cómo pequeños cambios en esta compleja danza de desarrollo celular pueden llevar a condiciones que afectan profundamente a la interacción social y comunicativa. Por ejemplo, al entender más acerca de cómo las neuronas y las células gliales se desarrollan y se comunican entre sí, podemos comenzar a desentrañar los misterios de por qué, en algunas personas, este proceso difiere y cómo esto puede impactar en la forma en la que perciben e interactúan con el mundo. Por si fuera poco, el estudio ilumina las sutiles pero significativas diferencias en la expresión génica entre niñas y niños respecto al autismo, proporcionando un prisma a través del cual

poder examinar por qué este trastorno muestra diferentes tasas de incidencia y manifestación entre géneros”[35].

¿En qué grado es razonable utilizar tales sistemas formales como modelos de la forma en que el cerebro manipula ideas? Es necesario entender que en el cerebro no hay símbolos tipográficos; sin embargo, hay algo mejor todavía: elementos activos que pueden almacenar información y transmitirla, además de recibirla de otros elementos activos. Por consiguiente, tenemos allí símbolos activos en lugar de símbolos tipográficos pasivos. En el cerebro, las reglas están entremezcladas con los propios símbolos, en tanto que, en el papel, los símbolos son entidades estáticas y las reglas están en nuestra cabeza. Es importante evitar la suposición, sugerida por la naturaleza bastante estricta de todos los sistemas formales, de que el isomorfismo existente entre símbolos y cosas reales es una correspondencia rígida, elemento por elemento, como los hilos que unen un títere a la mano que lo guía. En el sistema formal TNT (Typographical Number Theory o Teoría Tipográfica de Números) del libro Gödel, Escher, Bach de Douglas Hofstadter, la letra S representa el operador «el sucesor de» (sumar 1), O representa el cero, el símbolo + representa la suma y el punto · representa la multiplicación. Así, cada cadena de símbolos denota un número natural de forma puramente sintáctica.

Cuando decimos que en el TNT no existen "números" abstractos directos, sino *numerales* formados por cadenas de la letra “S” aplicadas a “o” (por ejemplo, SO es 1, SSO es 2). Dos cadenas complejas diferentes pueden representar el mismo número. Ambas expresiones representan el mismo número, pero no es evidente a

[35] *Un avance monumental: el primer atlas de las células del cerebro humano*. Francisco José Esteban Ruiz. Profesor Titular de Biología Celular, Universidad de Jaén

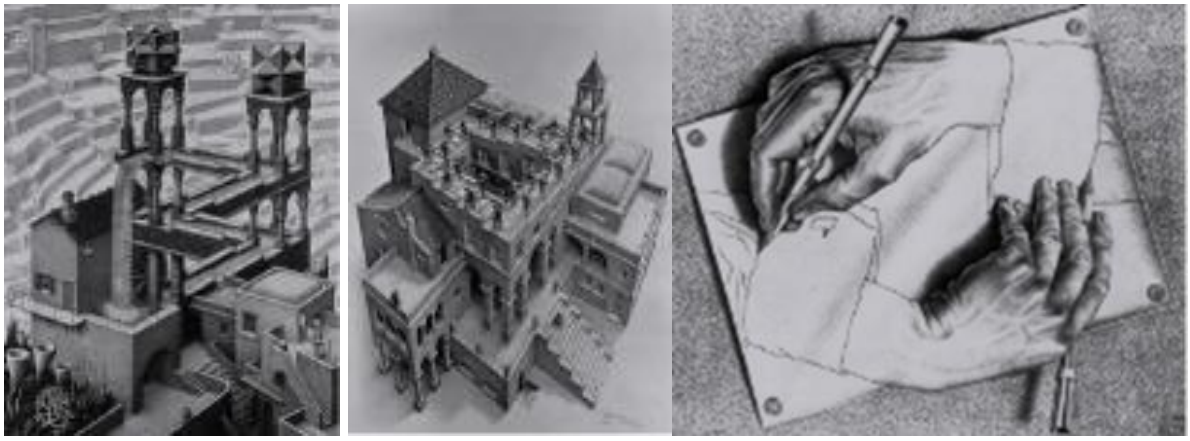
simple vista; requiere aplicar las reglas de inferencia y los teoremas de TNT para demostrar su equivalencia. Como no sabemos explicar mejor estos sistemas, este libro de Douglas R. Hofstadter está diseñado justamente para eso: para volar la cabeza, hacerte dudar de la lógica y entrelazar matemáticas, arte y música. El libro mantiene esa concesión con los fascinantes mundos invisibles. Hofstadter habla constantemente de cómo realidades invisibles, ocultas o abstractas emergen a partir de reglas muy simples.

El universo de la música (Bach) nos lleva con unas pocas notas invisibles en el aire, al cruzarse y perseguirse (como en las fugas), crean una arquitectura mental gigantesca y emocionante. El universo del arte del imaginativo (M.C.Escher)[36] nos hace ver cómo un dibujo plano en un papel esconde dimensiones imposibles, mundos donde el agua sube en vez de bajar o donde las manos se dibujan a sí mismas. En el universo de la mente vemos la actividad de unas neuronas materiales y "ciegas" dando origen a algo invisible, inmaterial y mágico llamado "consciencia" o "yo". No hace falta dominar las matemáticas de TNT para disfrutar del viaje. Lo hermoso de esos mundos es ver cómo las estructuras invisibles sostienen todo lo que sí podemos ver y sentir. El verdadero corazón de este libro es entender cómo lo invisible sostiene a lo visible, la realidad está hecha de capas, y cada capa es un universo oculto para la que está abajo. Una hormiga individual es un ser simple, casi un autómata. No sabe qué es un mapa, ni qué es el invierno, ni qué es la arquitectura. Sin embargo, cuando miles de hormigas interactúan, emerge un "universo invisible": *el alma del hormiguero*. Si un científico mirara tu

[36] Maurits Cornelis Escher (1898–1972) no fue principalmente un pintor, sino un célebre artista gráfico y grabador neerlandés. Es mundialmente famoso por sus grabados en madera (xilografías), litografías y dibujos de perspectivas imposibles, teselados y mundos imaginarios que juegan con la geometría y la ilusión óptica

cerebro con el microscopio más potente del mundo, solo vería células, electricidad, agua y química. Jamás vería tus recuerdos, tu personalidad, tus miedos ni tus sueños. Tu consciencia es un universo absolutamente real, pero completamente invisible para la materia que lo sostiene. Hofstadter llama a esto "bucles extraños": el momento mágico en el que las cosas materiales (hormigas, notas, neuronas) se organizan de tal forma que dan un salto y crean un universo invisible e inteligente.

Al observar sus grabados, tu ojo experimenta una ilusión óptica genial. Todo parece perfectamente lógico tramo a tramo, pero el conjunto revela un universo físicamente imposible. Una *escalera infinita (Subiendo y bajando)* nos muestra un patio en el tejado de un monasterio donde unos monjes caminan por una escalera



*Obras de Maurits Cornelis Escher (1898–1972)*

cuadrangular. Si sigues a un monje, verás que *no para de subir*

*peldaños*, pero milagrosamente vuelve siempre al mismo punto de partida. Es un bucle perpetuo.

La cascada imposible (Cascada) donde el agua cae con fuerza, mueve una noria y luego fluye cuesta arriba por un canal zigzagueante hasta volver a la cima de la cascada. Localmente el camino parece plano o en bajada, pero globalmente forma un circuito cerrado eterno. En el cuadro donde están dibujándose las manos

*(Manos dibujando), e*l cuadro muestra un papel blanco sobre el que una mano dibuja con lápiz el puño de una camisa. De ese puño cobra volumen una segunda mano real que, a su vez, está dibujando a la primera mano. ¿Cuál de las dos empezó el dibujo? Ninguna; se crean la una a la otra en un bucle cerrado. Hofstadter junta a ambos genios en el libro Bach y Escher porque inventaron lo mismo en artes distintas. Escher te hace "subir" visualmente para terminar en el principio. Bach te hace "subir" musicalmente mediante modulaciones continuas (como en su Ofrenda Musical), donde la melodía se eleva de tono constantemente pero, sin que te des cuenta de la transición, aterriza de golpe en la nota inicial. Escher convierte en líneas y sombras el mismo universo invisible de patrones abstractos que Bach compone con el sonido de los instrumentos.

*Godel-Escher-Bach: ¿una eterna trenza dorada*"? de Douglas Hofstadter Premio Pulitzer de no ficción general en 1980 es una obra monumental que entrelaza las ideas del matemático Kurt Gödel, el artista M. C. Escher, y el compositor Johann Sebastian Bach para explorar uno de los grandes misterios de la humanidad: la conciencia. Hofstadter utiliza los trabajos de estos tres genios como metáforas de estructuras autorreferenciales, sistemas formales, y la emergencia de significados complejos a partir de reglas simples. Visitando elementos clave de la obra de estos tres personajes, como el Teorema de incompletitud de Gödel: la idea de que en cualquier sistema formal hay proposiciones que no pueden ser probadas ni refutadas dentro del sistema; la obra gráfica de Escher que juega con la percepción, la paradoja y la autorreferencia visual, como "Manos dibujándose" o "Relatividad"; y las composiciones de Bach llenas de simetrías, y que usa también como analogía de estructuras autorreferenciales, Hofstadter conecta estos temas con conceptos.

Para engañar al oído de la misma manera que Escher engaña al ojo, Johann Sebastian Bach utiliza una genialidad matemática y musical llamada *«bucle extraño» o «jerarquía enredada***»**. Su truco maestro consiste en hacerte sentir que estás *subiendo continuamente una escalera*, cuando en realidad te estás moviendo en círculos. El ejemplo más famoso de esto se encuentra en su obra *La Ofrenda Musical*, específicamente en un canon titulado *Canon por Tonos* (o *Canon Perpetuus*). Así es como Bach logra este "universo invisible" del engaño auditivo. *La Modulación Infinita (Subir sin avanzar) aparece en* el *Canon por Tonos*. Bach introduce un tema musical y, a medida que la melodía avanza, la va *modulando* (cambiando de tono o de clave). La melodía empieza, por ejemplo, en la nota Do. Al final de la primera estrofa, sin que te des cuenta porque la transición es suavísima, la música se ha elevado a la nota Re. La siguiente vuelta empieza en Re y termina en Mi. Así continúa: de Mi a Fa sostenido, de ahí a Sol sostenido, etc. El truco de magia ocurre tras seis repeticiones. Al final de la sexta vuelta, la música debería haber subido tanto que se saldría del teclado, pero Bach calcula los intervalos matemáticamente para que, en ese punto exacto, *la melodía regrese en secreto a la nota Do original*.

El oyente tiene la clarísima sensación de que la música no ha parado de ascender en tono y energía, pero de repente se encuentra en el punto de partida. Es *exactamente igual* que la escalera de Escher: caminas hacia arriba paso a paso, pero tras dar la vuelta al patio, estás de nuevo en el primer peldaño. Aunque Bach lo hacía mediante la estructura de las notas, hoy en día la ciencia ha llevado este concepto al extremo con algo llamado *«Escala de Shepard»* (un concepto físico-acústico muy ligado al libro de Hofstadter). Consiste en superponer varias capas de la misma melodía en diferentes

octavas (unas muy agudas, otras medias y otras muy graves). Mientras la melodía sube, la capa más aguda se va volviendo cada vez más silenciosa hasta desaparecer. Al mismo tiempo, en el fondo, empieza a sonar una capa nueva muy grave que va ganando volumen. Tu cerebro se concentra tanto en la melodía que sube, que no registra la escala nueva que entra por debajo. El resultado es una ilusión auditiva espeluznante: *una escala musical que parece subir eternamente* hacia el infinito sin llegar nunca a un límite. Es el equivalente auditivo exacto de un poste de barbería, donde las franjas de colores parecen subir todo el tiempo, pero nunca se mueven de su sitio. Bach no hacía esto solo por diversión. En la partitura original del *Canon por Tonos*, le escribió una dedicatoria en latín al rey Federico el Grande de Prusia: *«Que la gloria del Rey ascienda de esta manera, a través de los tonos»*. Era un doble juego: un cumplido piropeando al rey, pero también un chiste matemático invisible, porque Bach sabía perfectamente que esa ascensión era una ilusión y que la música siempre volvía al suelo.

## 9.3. El mundo invisible de la célula

En 1970, el premio Nobel *Jacques Monod*[37] calificó al ADN como el «secreto de la vida» y dijo que el descubrimiento de su estructura y función —especialmente «la comprensión de la base física de las mutaciones»— significa que «por fin ha quedado firmemente fundamentado el mecanismo del darwinismo», y que los

[37] Los códigos postales de la célula: ¿dónde está el administradorde correos? Jonathan Wells, Ph.D. Tema publicado por SEDIN: Sobre el origen de la forma organísmica.Son teorías organísmicas (como las de Kurt Goldstein o la influencia de la Gestalt), que ven al ser humano como una unidad completa y holística, impulsada de forma natural hacia el crecimiento, la integración y el desarrollo personal.

humanos son «un mero accidente». Según el neodarwinismo, todos los seres vivientes descienden de un antecesor común, con modificaciones por selección natural que actúa sobre variaciones al azar generadas por mutaciones en el ADN. Pero sólo si el desarrollo de un embrión fuese programado por su ADN podrían las mutaciones en el ADN proporcionar la materia prima para una evolución a gran escala. De modo que el neodarwinismo *supone* que el desarrollo del embrión está controlado por un programa genético. Pero hay un grave problema acerca de esta suposición. Las muchas diferentes clases de células en un animal o en una planta se desarrollan a partir de una sola célula fertilizada, el huevo. Los humanos, por ejemplo, están constituidos por células que forman huesos, piel, músculos, órganos digestivos, nervios, y muchos otros tejidos. Estas células son tan diferentes entre sí en forma y función que un observador no instruido podría pensar que representan diferentes especies.

Sin embargo, todas estas células contienen el mismo ADN, lo que es cosa sabida desde hace mucho tiempo por los embriólogos como «equivalencia genómica». Al dividirse el óvulo fertilizado, dota de un conjunto completo de ADN (su «genoma») a todos sus descendientes —con unas pocas excepciones menores, como los eritrocitos, que no tienen ningún ADN. Pero si las células óseas, de la piel, musculares, digestivas y nerviosas tienen el mismo ADN, ¿por qué son tan diferentes? ¿Por qué las células nerviosas no segregan juicios que digieran el cerebro? Una parte de la respuesta es que, aunque las células del cerebro, las neuronas, tienen los genes para los juicios digestivos, estos genes quedan desactivados en los nervios. Al desarrollarse un embrión, sus células pasan por una fase llamada «diferenciación» que activa algunos genes, y deja otros desactivados. Pero esto no resuelve el problema, por cuanto da por

sentado por qué dos células con el mismo ADN se diferencian de dos maneras distintas. Otra parte de la respuesta es que las células saben por alguna razón donde están en el cuerpo, y que se diferencian de forma correspondiente.

En julio de 2006, un artículo científico informaba que ciertas células tienen «códigos postales» en su ADN que se corresponden con sus ubicaciones. Según el artículo: Una pregunta fundamental en la biología del desarrollo es: ¿Cómo saben las células dónde se encuentran en el cuerpo? Por ejemplo, las células de la piel en el cuero cabelludo saben producir cabello, y las células de la piel en las palmas de la mano saben que no deben producir cabello. ... En este estudio, los autores presentan un modelo que explica cómo las células saben dónde se encuentran en el cuerpo. Comparando células procedentes de 43 ubicaciones concretas que dibujan un mapa preciso de todo el cuerpo humano, los autores han descubierto que las células usan un sistema de códigos postales para identificar la posición de la célula en el cuerpo humano. Por ejemplo, una célula en la mano expresa un conjunto de genes que ubica la célula en la parte superior del cuerpo (anterior), y otro conjunto de genes que ubica la célula como muy alejada del cuerpo o distal, y un tercer conjunto de genes que identifica la célula en el exterior del cuerpo (no interna). Así, cada conjunto de genes afina más el emplazamiento de la célula, como un código postal.

Sin embargo, la existencia de «códigos postales celulares» sigue sin dar solución al problema. Si el cuerpo humano fuesen España y las células fuesen sobres postales, cada uno comenzaría llevando todos los códigos postales del país en su superficie. Sólo después que el administrador de correos hubiera puesto cada sobre en una de las muchas ranuras en la pared para dirigirlo a su destino

final quedaría resaltado un código postal determinado. Evidentemente, el administrador de correos y el conjunto de ranuras desempeñan una función principal para determinar adónde va cada sobre. Si el ADN se corresponde con códigos postales que aparecen originalmente por igual en cada sobre, ¿dónde aparecen en el embrión el administrador de correos y las ranuras? ¿Qué es loque hace resaltar un código postal pero no otros? ¿Dónde aparece la importantísima información de desarrollo que dirige a las células a diferentes partes del cuerpo y que les dice dónde están y cómo deben diferenciarse? Al centrar la atención sobre el ADN como la supuesta fuente de materia prima para la evolución, el neodarwinismo ha minimizado sistemáticamente la naturaleza y la ubicación de la información del desarrollo en otros lugares en el embrión. Es obvio que hay mucho más en el desarrollo de los embriones que lo que se puede imaginar en el contexto de la filosofía neodarwinista.

En este artículo "*Los códigos postales de la célula: ¿dónde está el administrador de correos?* de Jonathan Wells, Ph.D se nos presenta un magno problema como es el lugar que ocupa cada célula en las múltiples clases de organismos que componen el ser humano, dado que el ADN es la misma copia para todas las células. La célula es la unidad básica en biología. Cada organismo o bien es una única célula o está formado por células. ¡El mundo de la célula es un universo fascinante lleno de complejidad, eficiencia y misterio! Por lo tanto, únicamente podremos apreciar las capacidades y las limitaciones de los organismos vivos, tanto animales como vegetales o microorganismos, si comprendemos la estructura y la función de las células. Estamos en medio de una revolución de la biología que ha traído consigo tremendos avances en el entendimiento de cómo están construidas las células y de cómo realizan las complicadas

funciones necesarias para la vida. La naturaleza dinámica de la célula es particularmente significativa, como se pone de manifiesto por su capacidad de crecer, reproducirse y especializarse, y por su habilidad para responder a estímulos y adaptarse a cambios en el medio ambiente. El mundo de la célula es un mundo complejo y sobre todo lleno de preguntas sobre que es la vida. Pero vamos a fijarnos en la enzima. Una enzima es una proteína especializada que funciona como un *catalizador biológico*[38]. Cada vez que comemos, en nuestro cuerpo se pone en marcha el complejo proceso de la digestión: los protagonistas en la descomposición de los alimentos y en la absorción de nutrientes son precisamente ellas, las enzimas. Sin las enzimas digestivas, los nutrientes de los alimentos que consumimos serían demasiado grandes y complejos para ser absorbidos por nuestro organismo.

Gracias a las enzimas podemos obtener beneficios reales de los alimentos que ingerimos. Las enzimas digestivas son proteínas producidas por nuestro organismo que actúan como catalizadores: aceleran las reacciones químicas implicadas en la digestión, sin consumirse en el proceso. A mediados del siglo XIX, el científico francés Louis Pasteur estudiando la fermentación alcohólica descubrió las enzimas que denominó inicialmente fermentos. Pasteur creía que la actividad enzimática era inseparable de las células vivas, pero en el año 1897 Eduard y Hans Buchner consiguieron extraer y separar, sin que perdieran su capacidad catalítica, las mismas enzimas de las correspondientes células. De hecho, una sola enzima puede reutilizarse muchas veces. Esto significa que acelera la

[38] Un catalizador biológico (o biocatalizador) es una sustancia que acelera las reacciones químicas en los seres vivos sin consumirse en el proceso. El ejemplo principal son las enzimas, que son proteínas (o ARN) que reducen la energía necesaria para que ocurran procesos vitales como la digestión.

velocidad de las reacciones químicas que ocurren dentro de las células del cuerpo, sin consumirse ni alterarse en el proceso. Sin las enzimas, las funciones vitales serían tan lentas que la vida no sería posible. Cada enzima actúa solo sobre una molécula específica (llamada sustrato), como una llave que solo abre un candado específico. Aumentan la velocidad de las reacciones químicas hasta millones de veces. Su actividad depende estrechamente de condiciones óptimas de temperatura y acidez (pH). Rompen los alimentos en nutrientes más pequeños para que el cuerpo los absorba. Ayudan a transformar la glucosa en la energía que usan las células. Y por último participan en la copia y reparación del material genético celular el ADN.

Para darnos cuenta de la alta perfección y su ajuste fino podemos ver en su actividad enzimas como la *Amilasa* que está en la saliva y rompe los carbohidratos mientras masticas. La *Lactasa* que descompone el azúcar de la leche (lactosa). Su falta causa intolerancia a la lactosa. La *Pepsina* que actúa en el estómago para digerir las proteínas de la comida. En virtud misma de su extrema especificidad, una enzima «clásica constituye una unidad funcional totalmente independiente. La función «cognitiva» de estos «demonios» se reduce al reconocimiento de su substrato específico, excluyendo todo otro cuerpo y todo acontecimiento que pueda producirse en la maquinaria química de la célula. La simple inspección de un esquema que resuma los conocimientos actuales sobre el metabolismo celular bastaría para hacemos adivinar que si incluso, en cada etapa, la enzima que tiene la carga cumple su tarea a la perfección, la suma total de estas actividades no podría conducir más que a un caos si éstas no estuviesen, de algún modo, sujetas las unas a las otras para formar un sistema coherente. Así se tienen

las pruebas más manifiestas de la eficacia extrema de la maquinaria química de los seres vivos, de los más «simples» a los más «complejos».[39]

En los animales se conoce por descontado desde largo tiempo la existencia de sistemas que aseguran la coordinación a gran escala de las performances del organismo. Tales son las funciones del sistema nervioso y del sistema endocrino. Estos sistemas aseguran la coordinación entre órganos o tejidos, es decir, en definitiva, entre células. Que en el seno de cada célula una red cibernética casi tan compleja como ella (si no más aún) asegura la coherencia funcional de la maquinaria química intracelular, donde se centran los descubrimientos que datan, en su mayoría, de los veinte si no de los cinco o diez últimos años. Se está muy lejos aún de haber analizado en su integridad el sistema que gobierna el metabolismo, el crecimiento y la división de las células más simples que se conoce: las bacterias. Pero, gracias al análisis detallado de ciertas partes de este sistema, se comprenden hoy bastante bien los principios de su funcionamiento. Entre estas proteínas reguladoras, las mejor conocidas en la actualidad son enzimas llamadas «alostéricas». Estas enzimas constituyen una clase particular, en razón de las propiedades que las distinguen de las enzimas «clásicas». Como estas últimas, las enzimas alostéricas reconocen y se asocian a un substrato específico, y activan su conversión en productos.

Jacques Monod fue un bioquímico francés, premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1965 junto con François Jacob y André Lwoff, por sus descubrimientos sobre la regulación genética de la síntesis de enzimas. Sus principales contribuciones científicas fueron

[39] El azar y la necesidad. Jacques Monod

en primer lugar el “modelo del operón (operon lac). Junto con François Jacob, propuso en 1961 el concepto de operón para explicar cómo se regula la expresión de los genes en bacterias. El estudio del metabolismo de la lactosa en Escherichia coli les permitió describir los genes estructurales, el gen regulador, el operador y el promotor, sentando las bases de la regulación génica procariota. También el descubrimiento y predicción del ARN mensajero (ARNm) en el marco del operón. Monod y Jacob predijeron la existencia de una molécula intermediaria que transmitía la información del ADN a los ribosomas para la síntesis de proteínas: el ARN mensajero. Este fue confirmado experimentalmente poco después por Jacob, Brenner y Meselson, constituyendo un hito en la biología molecular. Monod también descubrió el fenómeno de la “diauxia”. Se trata del crecimiento bifásico de las bacterias cuando se les ofrecen dos fuentes de carbono (por ejemplo, glucosa y lactosa). Este trabajo lo llevó a demostrar que ciertas enzimas no se sintetizan de forma constitutiva, sino que su producción puede ser inducida por la presencia de su sustrato, estableciendo el concepto de enzimas adaptativas o inducibles.

Con Jean-Pierre Changeux y Jeffries Wyman, Monod formuló en 1965 el modelo concertado (MWC) para explicar la regulación alostérica de las enzimas. Este modelo describe cómo la unión de una molécula reguladora (activador o inhibidor) en un sitio distinto del sitio activo puede cambiar la conformación de la proteína y modular su actividad enzimática, un principio fundamental de la regulación celular. Identificó el efecto de la glucosa sobre la expresión de genes relacionados con otros azúcares, fenómeno conocido como represión catabólica. Esto demostró que las bacterias priorizan ciertas fuentes de energía mediante mecanismos de control transcripcional. En

conjunto, estos descubrimientos no solo explicaron cómo se encienden y apagan los genes, sino que establecieron los fundamentos de la biología molecular y la regulación genética. Su famosa frase “Lo que es verdadero para E. coli[40] también lo es para el elefante” refleja la universalidad de los principios biológicos que descubrió. No seguiremos con más términos técnicos que aparecen en el fascinante mundo de la célula. Imaginemos un mundo diminuto, invisible al ojo humano, donde cada estructura cumple una función precisa, donde la información se copia, se traduce y se transmite, y donde la energía se transforma constantemente. Ese mundo es la célula: la unidad fundamental de la vida. Aunque no la veamos, cada uno de nosotros somos un universo de aproximadamente 30 billones de células, todas coordinadas en una sinfonía perfecta.

La palabra "célula" proviene del latín cellula, que significa "pequeña habitación", nombre que le dio Robert Hooke en 1665 al observar finas láminas de corcho. Lo que Hooke vio eran paredes vacías de células vegetales muertas, pero ese momento marcó el inicio de una revolución científica que transformaría nuestra comprensión de la vida. La teoría celular es el pilar de la biología moderna. Hoy, la biología se sustenta en tres principios fundamentales que conforman la teoría celular la cual afirma que todos los seres vivos están compuestos por una o más células. La célula es la unidad estructural y funcional básica de todos los organismos.Toda célula procede de otra célula preexistente (omnis cellula e cellula), principio enunciado por Rudolf Virchow en 1855.

[40] Escherichia coli, conocida como E. coli, es una bacteria que vive de forma natural en los intestinos de las personas y animales sanos. La famosa frase del premio Nobel Jacques Monod ("Lo que es verdadero para E. coli también lo es para el elefante") significa que la química básica de la vida y el código genético son iguales en todos los seres vivos, desde una pequeña bacteria hasta un enorme mamífero

Estos principios, aparentemente simples, tienen profundas implicaciones: si comprendemos las células, comprendemos la vida misma. Por eso, el estudio de la célula nos fascina tanto, aunque lo reduzcamos a dos grandes mundos como el de las células procariotas y eucariotas, separados estos tipos de células por una frontera evolutiva de miles de millones de años. Al menos esto es lo que nos dice la ciencia. Las más antiguas y las más abundantes del planeta son las procariotas e incluyen a las bacterias y arqueas[41] de un tamaño reducido entre 1y 5 micrómetros. A pesar de su simplicidad, las procariotas son extraordinariamente exitosas: pueden vivir en géiseres hirvientes, en hielo antártico, en el intestino humano o en ambientes con radiación letal.

Las células eucariotas son las células de los animales, plantas, hongos y protozoos. Su rasgo distintivo es la presencia de un núcleo verdadero, rodeado por una membrana nuclear, que protege el ADN. Además, contienen una compleja red de orgánulos membranosos. Son generalmente más grandes, entre 10 y 100 micrómetros. La hipótesis más aceptada sobre su origen es la endosimbiosis (Lynn Margulis, 1967): las mitocondrias y los cloroplastos fueron en su día bacterias libres que fueron "engullidas" por una célula ancestral, estableciendo una relación simbiótica permanente. Esto explicaría por qué estos orgánulos tienen su propio ADN circular y se dividen de forma independiente. Si la célula eucariota fuera una ciudad, cada orgánulo sería un edificio especializado: uno sería la biblioteca central que sería el núcleo con la “memoria maestra” de la célula. En el núcleo ocurre la transcripción donde el ADN se copia en ARN

[41] Las arqueas (Archaea) son microorganismos unicelulares procariotas. No tienen núcleo ni orgánulos internos. Aunque parecen bacterias, forman un dominio evolutivo totalmente distinto. Tienen membranas celulares únicas y pueden vivir tanto en ambientes extremos como en océanos o suelos comunes

mensajero (ARNm). El Nucleolo seria la fábrica de ribosomas. También la célula (ciudad) tiene mitocondrias que serían las centrales energéticas. En las mitocondrias se realiza la respiración celular aerobia, el proceso que transforma glucosa y oxígeno en ATP (adenosín trifosfato), la "moneda energética" universal. Es fascinante saber que el ATP se recicla constantemente: un ser humano produce y consume aproximadamente su peso corporal en ATP cada día. También en la célula hay una oficina de correos, el aparato de Golgi que recibe vesículas con proteínas y lípidos del RE[42], los modifica, los clasifica y los envía a su destino final (secreción, membrana, lisosomas). Funciona como un centro de empaquetado y distribución.

La célula está delimitada por una membrana plasmática, una frontera inteligente compuesta por una bicapa de fosfolípidos con proteínas integradas. Su modelo se conoce como "mosaico fluido" (Singer y Nicolson, 1972). Es semipermeable y regula qué sustancias entran y salen. Las células también se comunican entre sí mediante receptores de membrana, un lenguaje molecular complejo que coordina actividades en organismos multicelulares con procesos celulares fascinantes como el flujo de información. El dogma central de la biología molecular (Crick) establece que la traducción ocurre en los ribosomas, donde el ARN mensajero se lee en tripletes (codones), y cada codón especifica un aminoácido. El código genético es prácticamente universal: las mismas palabras químicas se usan en bacterias, plantas y humanos, evidencia de un ancestro común. Para un simple observador de los datos que nos dan los investigadores celulares nadie podría imaginar los interminables procesos

[42] Las proteínas y los lípidos fabricados en el retículo endoplasmático (RE) viajan empaquetados en vesículas de transporte revestidas por proteínas de cubierta como COPII, las cuales se desprenden de zonas especiales del RE para llevar su contenido directamente hacia el aparato de Golgi.

realizados en la microscópica célula. El ciclo de la vida es un espectáculo interminable que empieza con la mitosis, proceso por el cual una célula madre produce dos células hijas genéticamente idénticas. Es la base del crecimiento, la reparación de tejidos y la reproducción asexual. El ciclo celular incluye fases (G1, S, G2 y M) finamente reguladas por puntos de control. La Meiosis produce gametos (óvulos y espermatozoides) con la mitad de cromosomas, permitiendo la recombinación genética. Este proceso genera la diversidad genética que impulsa la evolución. La desregulación de la división celular conduce al cáncer: células que proliferan sin control. Comprender la célula es, por tanto, comprender la salud y la enfermedad.

Hay pues también células especializadas en la sociedad multicelular, En los organismos pluricelulares, las células se especializan. Una neurona puede medir hasta un metro de largo, un eritrocito carece de núcleo para transportar más hemoglobina, y una célula muscular está llena de mitocondrias para sostener la contracción. Todas ellas, sin embargo, comparten el mismo ADN; la diferencia radica en qué genes se expresan. La célula madre es la clave de esta maravilla: una célula indiferenciada con capacidad de autorrenovarse y diferenciarse en múltiples tipos celulares. Su investigación abre puertas a la medicina regenerativa. Con esto concluimos que el mundo de la célula es un universo en miniatura y es fascinador porque encierra en su diminuto espacio todos los secretos de la vida: información hereditaria, metabolismo, comunicación, adaptación y evolución. Cada célula es un microcosmos que funciona con precisión molecular asombrosa, y su estudio nos conecta con la historia profunda de la vida en la Tierra.

# 10. CIENTÍFICOS ESPAÑOLES ENTRE LOS MUNDOS INVISIBLES.

Quisiera empezar esta sección con un texto de "*El fabricante de honradez"* de Santiago Ramón y Cajal en el que critica las descarnadas descripciones de las obras didácticas, que no deberían estar desprovistas de fascinación e imaginación ante mundos que Cajal encuentra dignos de la inspiración de los poetas y de las meditaciones de los filósofos. Así describe Santiago[43] Ramón y Cajal los grandes mundos que se conocían entonces de las investigaciones propias y de otros científicos.

Y tampoco estarán desprovistas de interés para aquellos que, teniendo noticia de estos curiosos fenómenos por las frías y descarnadas descripciones de las obras didácticas, entiendan que la anatomía está reñida con la imaginación, que el concepto estático y dinámico de los órganos es indigno de la inspiración del poeta y de las meditaciones del filósofo.

"Por ventura, vosotros los que así pensáis, ¿habéis contemplado sin emoción, sin experimentar el estremecimiento de lo sublime, el fenómeno de la circulación de la sangre. ¿No os ha llenado de admiración el eterno correr del hematíe, impulsado por la

[43] El profesor de Federico Fliedner para ser más eficiente en su ayuda a los enfermos, estudió Medicina en la Universidad de Madrid. Su Tesis del Doctorado, dedicada a "La Higiene escolar y los ejercicios corporales", mereció la calificación de "Admirable" en la evaluación de Santiago Ramón y Cajal. Federico Fliedner también fue una figura relevante en la educación en España.

onda sanguínea del centro del capilar mientras que el glóbulo blanco, más prudente y discreto, busca un abrigo junto a la pared, rodando pausadamente sobre ella, como huyendo del tumulto de la corriente y de los choques y violencias de los glóbulos?

La curiosa movilidad ameboidea que permite al leucocito abrir una brecha en la pared vascular, desertando a las comarcas conjuntivas, a la manera del preso que lima las rejas de su cárcel para recobrar la ansiada libertad; los campos traqueales y laríngeos sembrados de pestañas vibrátiles ondeando por virtud de secretos impulsos como las espigas al soplo de brisa primaveral; el incansable latigueo del zooespermo, que movido por espontánea energía, corre en busca del óvulo, objeto de sus amores; la callada agitación del citodo[44] que, nuevo Proteo, experimenta en un instante caprichosísimas transformaciones; la célula nerviosa, la más noble raza de los elementos orgánicos, de estirpe epitelial, que tiende sus cien brazos de gigante como los tentáculos de un pulpo hasta las provincias fronterizas del mundo exterior, para vigilar las constantes asechanzas de las fuerzas físico-químicas; el óvulo, con su sencilla y severa arquitectura, que encierra el secreto de la evolución de las formas orgánicas, especie de nebulosa donde bullen en germen, mundos innumerables, que se desprenderán en futuros anillos: las geométricas rayas de las células musculares donde como en la locomotora, el calor se transforma en fuerza mecánica.

La célula glandular que, por sencilla manera fabrica las materias de la química viviente, consumiendo su propia vida con admirable generosidad, en provecho de las demás células sus hermanas; los elementos óseos, albañiles del edificio orgánico que

[44] El citodo era el nombre científico antiguo que se le daba a una masa de protoplasma o célula primitiva tan sencilla que no tenía núcleo.

fabrican el armazón calcáreo del esqueleto; las células adiposas modelos de economía doméstica que preveyendo nuestras futuras escaseces reservan los alimentos sobrantes del festín de la vida para utilizarlos en las huelgas orgánicas y en los grandes conflictos nutritivos; todos estos fenómenos tan varios, tan sabiamente dispuestos, seducen con atractivo irresistible, y su contemplación produce en nuestro espíritu una satisfacción tan pura como duradera.

Y si del campo de los fenómenos concretos de la vida nos remontamos a la amplia esfera de las doctrinas biológicas, ¡cuántas grandiosas creaciones del genio! ¡qué bellas y luminosas hipótesis!

La teoría celular nos presenta los seres organizados construidos con unas mismas piedras, las células o protoplasmas, ordenadas y yuxtapuestas con arreglo a diversos estilos arquitectónicos. Ella nos revela en las innumerables formas y complejas estructuras orgánicas un fondo común, una base física general, el protoplasma, materia albuminoide donde solamente la vida se encarna, y dotada de atributos y virtualidades idénticas en los dos reinos.

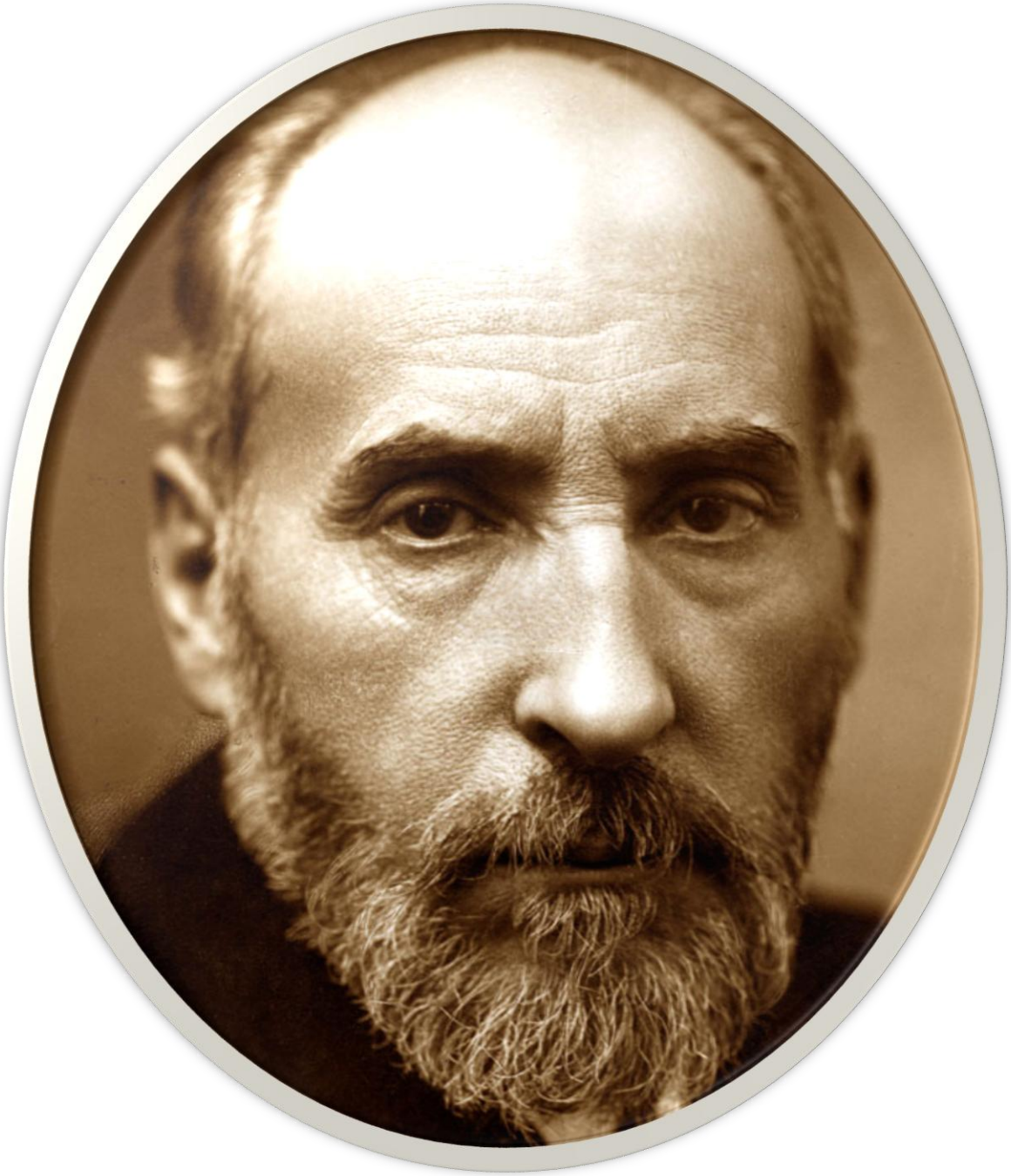
Esta unidad de composición, igualdad esencialmente democrática que identifica y confunde a todos los representantes de la vida, desde el hongo hasta el mamífero, viene a ser el memento homo que a todas partes nos sigue, insultando nuestra vanidad de dioses y mostrándonos que el hombre, el rey de la creación, la más elevada manifestación de la vida en el planeta, no posee ningún privilegio sobre los demás seres sus hermanos, pues como ellos, nace, se nutre, reproduce y muere, y como en ellos sus más nobles facultades se deben a las propiedades cardinales de una misma sustancia.

¿Y qué diréis de la hermosa teoría del desarrollo continuo de Remack y de Virchou, de esa luminosa concepción por cuya virtud las células de nuestro cuerpo se enlazan en estrechísima dependencia, como el darwinismo enlaza las especies o la atracción newtoniana los astros?

Por cada día, el genio del anatómico, comprimido hasta poco há en la órbita estrecha de los hechos concretos e incoherentes, remonta su vuelo a mayores alturas escalando las cimas de la abstracción científica y condensando el polvo infinito de los fenómenos biológicos en un corto número de verdades generales.

Y en conclusión, se ha dicho que la botánica es el jardín del naturalista; la histología debe constituir el jardín del biólogo y del médico. Allí podrá éste descansar como en tranquilo oásis de las fatigas de su azarosa profesión, cicatrizando las heridas que los roces con la realidad y la lucha por la vida producen en su alma, y el microscopio será para todos el templo sagrado donde la diosa naturaleza revelará sus más preciados secretos, siempre atenta y solícita para aquellos que paciente y respetuosamente la interrogan.

## 10.1. Santiago Ramón y Cajal



Aunque España haya quedado eclipsada por los grandes investigadores anglosajones, como Judson, Watson, Crick etc. sin embargo ha dado figuras importantes en la historia de la biología. Investigadores biológicos españoles de referencia serían *Santiago Ramón y Cajal (1852–1934)* que quizás sea el más universal, siendo Premio Nobel en 1906. Cajal ha sido reconocido como el fundador de la neurociencia moderna. Su aportación clave fue demostrar la individualidad de la neurona y formular la *doctrina neuronal*. Cajal es un ejemplo de cómo una teoría biológica puede nacer de una combinación de técnica, intuición visual y filosofía natural. Su obra es casi una fenomenología del tejido vivo. “Con rara habilidad, Santiago Lorén[45] penetra en la intimidad de D. Santiago Ramón y Cajal que, en efecto, mantiene un sugestivo paralelismo con la figura de D. Quijote. Español de insobornable voluntad y esforzado trabajador —que nunca conoció el desaliento— fue «hombre ejemplar», en el más riguroso sentido de la frase orteguiana, en todos los campos del quehacer humano —como hombre, como científico y patriota—. Santiago Ramón y Cajal fue uno de los pocos intelectuales de su tiempo que no unió su voz al funesto coro de los que se lamentaban del dolor de España. Cuanto mayor era la ruina viva de nuestro pueblo, con mayor entusiasmo se entregaba al estudio y a la experimentación. Fue, pues, no solamente una de las cumbres de la ciencia, sino, al mismo tiempo, un gran patriota. Tuvo la certeza, como muy bien nos indica el doctor Santiago Loren, de que la pérdida de territorios, los desastres y la desorientación política de la época se podían atenuar haciendo que el nombre de España, cuando menos, sonase con toda efusión en el terreno de los valores

[45] *Historia de una voluntad*. Santiago Lorén

intelectuales —en la gran geografía del espíritu—. Esto, acaso, es indiscutiblemente lo que le dio a D. Santiago Ramón y Cajal la fibra auténtica de los escogidos. Y en este bello libro de Santiago Loren, uno de los pocos que para nuestra propia vergüenza se han escrito sobre este singular hombre, se nos habla detenida y objetivamente sobre su triple naturaleza: la del hombre, la del sabio y la del patriota".

Destaca en su obra escrita "*El fabricante de honradez*" que es un cuento satírico y de ciencia ficción escrito por el científico español Santiago Ramón y Cajal (publicado en su obra de 1905, *Cuentos de vacaciones*). El relato narra el experimento del doctor Alejandro Mirahonda en el pueblo de Villabronca, donde aplica una "vacuna moral" e hipnosis colectiva para erradicar el vicio y las pasiones humanas. El doctor Mirahonda llega a Villabronca e introduce un supuesto suero antipasional y técnicas de sugestión para convertir a criminales y viciosos en ciudadanos íntegros. El experimento da un resultado rotundo. La criminalidad desaparece, las tabernas se vacían de disputas, la gente trabaja con fervor y reina una honradez estricta pero forzada en todo el pueblo durante un año. Se descubre que el suero milagroso no era más que agua común y que todo dependía de la sugestión psicológica. Al cesar el control y desatarse la contrasugestión, las pasiones reprimidas explotan de forma violenta en una gran bacanal de desenfreno. El doctor huye despavorido. Concluye que el vicio y el dolor son resortes complejos de la naturaleza humana y que la moralidad impuesta por la fuerza artificial no sustituye a la verdadera evolución voluntaria del espíritu.

Se podría pensar que el Dr, Ramón y Cajal usara la ficción para retratar sus propias vivencias. Sin embargo, más que una biografía encubierta, *El fabricante de honradez* funciona como un espejo de sus obsesiones intelectuales, científicas y filosóficas, proyectando su

mentalidad y su época a través de la sátira. Cajal tiene una faceta oculta de hipnotizador y el doctor Mirahonda usa la sugestión psicológica y la hipnosis colectiva para controlar al pueblo. En la vida real, Ramón y Cajal fue un apasionado investigador del hipnotismo. Durante la década de 1880, abrió una clínica médica de sugestión en Valencia e integró la Sociedad de Hipnología de Madrid. Llegó a utilizar la hipnosis como anestesia para el parto de su propia esposa, por lo que el trasfondo científico del cuento proviene directamente de sus experimentos personales. Por otra parte, Cajal juega con dos preocupaciones como la obsesión con el cerebro y la regeneración de España. El relato muestra el deseo utópico de "curar" los vicios de un pueblo atrasado y conflictivo (Villabronca). Esto refleja fielmente el pensamiento de la Generación del 98 y el Regeneracionismo, movimientos a los que Cajal pertenecía. Como patriota y científico, Cajal creía firmemente que el gran mal de España era la falta de educación y de cultivo del cerebro, y que la ciencia debía ser el motor para transformar y "limpiar" moralmente el país.

En el cuento, la solución impuesta desde arriba (la vacuna y la sugestión) termina en un fracaso absoluto y violento cuando cesa el control. Aquí vemos al Ramón y Cajal más maduro y escéptico. Él sabía perfectamente que el cerebro y la moral humana cambian mediante el esfuerzo, el estudio y la evolución voluntaria, y no a través de dogmas, fanatismos o falsas medicinas milagrosas. Tanto el personaje de ficción como el propio Cajal compartían el mismo santuario: el laboratorio. Para Cajal, el microscopio era su ventana al mundo; para Mirahonda, sus probetas eran herramientas de control social. El cuento es una advertencia temprana (y muy adelantada a su época) sobre los peligros de una ciencia que intenta jugar a ser Dios sin medir las consecuencias éticas. En sus memorias oficiales,

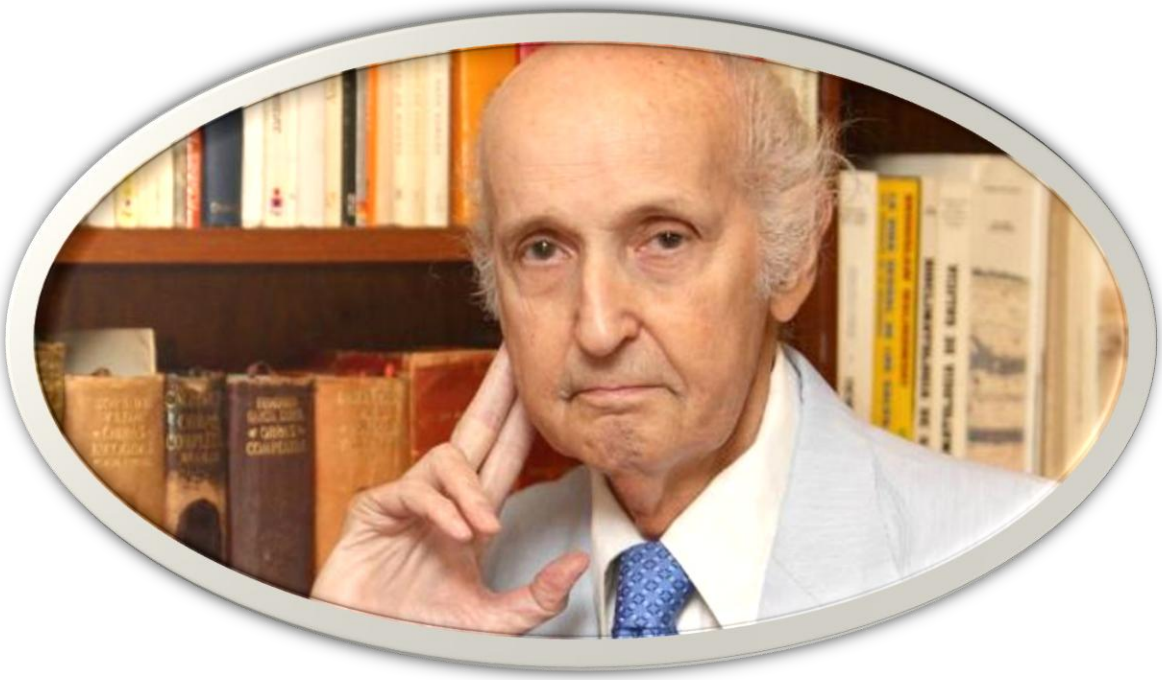
Santiago Ramón y Cajal no se limita a hacer una lista aburrida de sus éxitos científicos. Al contrario, se muestra con una honestidad brutal, desnudando sus defectos, sus peleas familiares y cómo su carácter rebelde moldeó al genio. El libro arranca mostrando la durísima relación con su padre, Justo Ramón, un médico cirujano de carácter inflexible. Su padre quería que Santiago fuera médico a toda costa y detestaba las inclinaciones artísticas de su hijo. El "vago" indomable: Cajal se retrata a sí mismo como un niño terrible, rebelde, que odiaba la memorización escolar. Prefería escaparse a los campos de Ayerbe, trepar tapias, cazar pájaros y fabricar cañones caseros con los que llegó a derribar la tapia de un vecino (lo que le costó terminar en la cárcel del pueblo con solo once años).

Santiago quería ser pintor. Su padre, para quitarle esa "distracción", llegó a confiscarle los pinceles. Cajal explica en sus memorias cómo su talento para el dibujo, lejos de perderse, fue la clave de su Premio Nobel. Al no existir cámaras fotográficas acopladas a los microscopios, él dibujaba las neuronas a mano alzada con una precisión estética impresionante. Sus dibujos científicos no eran solo esquemas; eran arte que permitía entender el cerebro. España era un país científicamente aislado y atrasado a finales del siglo XIX. Cajal se describe a sí mismo como un náufrago intelectual. Al no tener recursos del gobierno, tuvo que comprarse su propio microscopio con el dinero de su sueldo militar y montar un laboratorio rudimentario en la cocina de su casa. Sus memorias transmiten la épica de un hombre que, con herramientas casi caseras, derrotó a los grandes laboratorios alemanes y franceses que tenían toda la financiación del mundo. Su paso como médico militar en la guerra de Cuba (1874-1875) es uno de los capítulos más oscuros y realistas. Lejos de la gloria, describe el horror de las

enfermedades tropicales (la malaria y la disentería que él mismo padeció) y la corrupción del sistema militar colonial, que lo dejó destrozado físicamente y casi en la miseria. Esto forjó su carácter resiliente.

En aquella época, la ciencia creía que el cerebro era una red continua y difusa (la teoría reticular). Cajal demostró que las neuronas son células individuales que se comunican entre sí, pero no se tocan (la doctrina de la neurona). Muchos historiadores ven aquí un reflejo de su propia vida: Cajal era un individualista feroz, un hombre que se hizo a sí mismo de forma independiente, igual que sus amadas neuronas. *"Recuerdos de mi vida"* demuestra que detrás del científico de barba blanca y mirada seria, había un hombre que amaba el culturismo (en su juventud fue un atleta obsesionado con los músculos), la fotografía y la literatura.

## 10.2. Severo Ochoa (1905–1993)



Premio Nobel en 1959 por el descubrimiento de la polinucleótido fosforilasa. Contribuyó decisivamente al desciframiento del código genético. Ochoa es un puente entre la bioquímica clásica y la biología molecular emergente que Judson narra en *The Eighth Day of Creation (El octavo día de la creación)*. Su figura permite insertar a España en esa genealogía. Severo Ochoa de Albornoz nació en 1905 en Luarca (Asturias). En 1922 inició sus estudios en la Facultad de Medicina de la Universidad de Madrid, y durante su estancia se alojó en la Residencia de Estudiantes. Cuando acabó la licenciatura de Medicina en 1928, se marchó al laboratorio del Premio Nobel Otto Meyerhof, primero en Berlín y luego en Heidelberg. En 1930 volvió a Madrid para realizar su Tesis Doctoral que defendió en 1934, después de pasar dos años en el laboratorio de Sir Henry Dale en el National Institute of Medical

Research en Londres. En 1935 comenzó a trabajar en el Instituto de Investigaciones Clínicas y Médicas creado por Carlos Jiménez Díaz.

En 1936 Ochoa se marchó de España junto a su mujer, Carmen, para volver a trabajar en el laboratorio de Meyerhof. Posteriormente trabajó con Rudolph Peters en la Universidad de Oxford y finalmente, en agosto de 1940, Ochoa fue admitido en el laboratorio de los Premios Nobel Carl y Gerty Cori en la Washington University School of Medicine en St. Louis.

En 1942 obtuvo una beca para trabajar en el Departamento de Medicina de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York y pudo impartir clases a sus primeros estudiantes de doctorado y postdoctorado (entre los que se encontraba Arthur Kornberg) y posteriormente obtuvo una plaza de Profesor Ayudante de Bioquímica. En 1944, ocupó la cátedra del Departamento de Farmacología y en 1954 fue nombrado Jefe del Departamento de Bioquímica de la Universidad de Nueva York.

En 1953 se incorporó al laboratorio de Ochoa Marianne Grunberg-Manago cuyo trabajo dio lugar al descubrimiento de un nuevo enzima, la polinucleótido fosforilasa, capaz de sintetizar in vitro ácido ribonucleico (RNA). El trabajo se publicó en 1955 en la revista Journal of the American Chemical Society, y le valió a Ochoa el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1959. El uso de la polinucleótido fosforilasa fue esencial en el desciframiento de la clave genética. En 1974, dejó la Jefatura del Departamento de Bioquímica y fue nombrado Investigador Distinguido en el Instituto Roche de Biología Molecular en Nutley, New Jersey. Severo Ochoa fue un investigador fascinado por los distintos aspectos de la Bioquímica y la Biología Molecular, siempre ubicado en la frontera entre ambas a las que contribuyó de manera esencial. Pasó los últimos años de su

vida en el Centro de Biología Molecular (CBM), que es un Centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y de la Universidad Autónoma de Madrid, concebido para que el Nobel regresase a España a realizar su investigación. Además de su papel esencial en la creación y desarrollo del CBM, Ochoa puede considerarse el padre de la Biología Molecular en España ya que, directa o indirectamente, ha formado a un gran número de investigadores en este campo, y ha estimulado siempre el desarrollo de la investigación en esta área. El 1 de noviembre de 1993 el mundo entero perdió un gran investigador, un gran maestro y una gran persona. Sus restos descansan, junto con los de su mujer Carmen, en el cementerio de Luarca.

La clave del mundo científico de Severo Ochoa es que su trayectoria constituye uno de los puentes más decisivos entre la bioquímica clásica —centrada en el metabolismo energético— y la biología molecular moderna —centrada en la síntesis de ácidos nucleicos y el desciframiento del código genético. Su obra es, en cierto sentido, la transición entre la química de la vida y la información de la vida. La contribución más célebre de Ochoa fue el descubrimiento y caracterización de la *polinucleótido fosforilasa*, una enzima capaz de sintetizar ARN in vitro. Este hallazgo abrió la puerta a los primeros experimentos sistemáticos para descifrar el código genético, porque permitía generar moléculas de ARN con composiciones controladas. Premio Nobel (1959): compartido con Arthur Kornberg por el descubrimiento de los mecanismos de síntesis biológica de ácidos nucleicos (ARN y ADN). Su laboratorio demostró que la información genética podía manipularse químicamente, inaugurando la era de la biología molecular experimental. Aunque el Nobel eclipsa todo, Ochoa desarrolló una obra científica mucho más

amplia y coherente. Sus primeros trabajos, bajo la influencia de Otto Meyerhof, se centraron en la bioquímica de la contracción muscular y la glucólisis. Estudió la función de la vitamina B1 (tiamina) y los mecanismos enzimáticos de la respiración celular. Su gran aportación, lo sitúa en la genealogía de la biología molecular junto a Watson, Crick, Kornberg y Nirenberg y su mundo científico es también un mapa de instituciones clave en la historia de la biomedicina del siglo XX.

Ochoa es un científico de frontera. Transita de la fisiología clásica a la biología molecular, mostrando cómo los conceptos de "información", "código" y "síntesis" transforman la comprensión de la vida. Su obra revela la dimensión invisible de la vida: enzimas, rutas metabólicas, ARN sintético… un universo que encaja con tu interés por los "mundos invisibles" biológicos. Su trayectoria encarna la internacionalización de la ciencia española como caso paradigmático de cómo la ciencia se desarrolla en redes transnacionales. El descubrimiento del ARN sintético puede dialogar con tus reflexiones sobre complejidad irreducible: ¿hasta qué punto la síntesis artificial de moléculas biológicas ilumina o tensiona las teorías evolutivas? Lo extraordinario de Ochoa no es solo lo que descubrió, sino cómo pensaba la vida. Su laboratorio fue uno de los primeros lugares donde se comprendió que *la vida es una escritura*, y que esa escritura puede ser manipulada, reconstruida, sintetizada. En sus escritos aparece un rasgo que define su mundo científico: una mezcla de sobriedad, rigor y humildad. Nunca se presenta como un genio solitario, sino como parte de una cadena de maestros y discípulos. Esa actitud es coherente con su ciencia: la enzimología es una disciplina de paciencia, de observar cómo pequeñas piezas invisibles realizan tareas precisas. Ese pudor intelectual es también una forma de ética

científica: la vida es demasiado compleja para ser tratada con arrogancia.

Su llave al mundo invisible fue la polinucleótido fosforilasa. El descubrimiento de esta enzima no es solo un logro técnico. Es un gesto cognitivo: por primera vez, el ser humano podía generar ARN en un tubo de ensayo. Eso significaba que la información biológica puede ser imitada y que la vida tiene reglas internas que pueden ser exploradas experimentalmente. Que la vida es como un texto que se escribe a sí mismo, y el científico como quien aprende a leer sus alfabetos ocultos. Ochoa no descifra el texto completo, pero descubre una de las plumas con las que la vida escribe. Ochoa es un hombre que pasó de estudiar la energía de la vida a descubrir cómo la vida escribe su propia información. Ese salto —del músculo al ARN— es su verdadera historia. Todo lo demás son escenarios porque Ochoa trabajaba con enzimas diminutas, invisibles, que ensamblan letras biológicas. Ochoa es el artesano que aprende a leer el alfabeto invisible con el que la vida se escribe. Nada más y nada menos. Ochoa es el artesano que descubre que la vida tiene un alfabeto secreto, y se atreve a tocarlo con la delicadeza de quien sabe que cada letra late, como quien toca un hilo de luz, aunque sea invisible.

Dice Severo Ochoa en una revista de Villar de Luarca en 1080:

«Para mí fue bastante pronto claro que yo lo que quería era dedicar mi vida a la investigación científica. Eso no me cayó del cielo, me cayó de la personalidad científica mayor que ha tenido España y una de las mayores que ha tenido el mundo, que era don Santiago Ramón y Cajal, y por las lecturas de sus obras. De su vida y consejos llegué a la conclusión de que yo no quería hacer lo que había hecho Ramón y Cajal porque eso es imposible, pero sí seguir su camino».

«De la Residencia en sí han hablado otras personas con mucha más autoridad que yo (…). En la Residencia no se respiraba, se mascaba un ambiente de dedicación al cultivo de la inteligencia y el conocimiento y esto se debía a don Alberto [Alberto Jiménez Fraud, director de la misma], hombre cultísimo, cordial, generoso, a quien no puedo describir con precisión sino con palabras inglesas; don Alberto era un verdadero “scholar” y un “gentleman” como pocos. (…) No voy a hablar aquí de los excepcionales actos culturales que en la Residencia tenían frecuentemente lugar: conferencias de Deiserling, Einstein, Marie Curie y otras grandes personalidades, recitales de música de cámara (por ejemplo, de Wanda Landovska), etc. De esta forma, la Residencia creó una élite, pero una élite demasiado minoritaria. Deberían haber existido “Residencias” en Madrid y otras partes del país para elevar la cultura española al nivel que alcanzó en otras naciones». (*Escritos, pp. 32-33)*

Sobre Ramón y Cajal:

«No soy historiador y no podría hablar con autoridad de la biología hispana anterior a Cajal. Creo que los biólogos españoles de mi generación y de la de Sols[46] derivamos directamente de Cajal y debemos nuestra trayectoria vital al impacto de su colosal labor y al estímulo y ejemplo de su extraordinaria personalidad. La etapa cajaliana se inicia en la segunda mitad del siglo pasado y termina con la muerte de don Santiago poco antes de la guerra civil. La labor de Santiago Ramón y Cajal y sus discípulos y colaboradores infunde a la biología española un vigor extraordinario y, por qué no decirlo,

[46] Alberto Sols (1917–1989) fue un médico y bioquímico español, considerado el pionero e impulsor fundamental de la Bioquímica en España. Creó escuela y formó a varias generaciones de investigadores, estableciendo un alto nivel de rigor científico equiparable al internacional. Introdujo y desarrolló la bioquímica moderna en España a partir de los años 50.

insospechado. Al llamar a esta era «cajaliana» no quiero decir que no hubiese más investigación que la de Cajal y su escuela, pero esta domina el panorama científico español y trasciende con vigoroso impacto mucho más allá de las fronteras de la Península Ibérica. Para mí, Cajal fue lucero y guía de todos los biólogos de estirpe hispana de la generación posterior, así como lo fue de muchos de su propia generación».(*Escritos, p. 145*)

«Nunca hay nada que me satisfaga más que estar cerca de la juventud. Aparte de mi trabajo científico, quizás lo que más me satisface es aquellas personas a cuya formación yo he contribuido. Esas personas están desperdigas por todo el mundo y hablan muchos idiomas, pero la existencia de esas personas es lo que realmente me hace sentirme satisfecho de mi labor; modestamente satisfecho, pero satisfecho de mi labor». (*Discurso a los alumnos del IES Severo Ochoa de Alcobendas, 24 de marzo de 1988*)

Para terminar con una imagen más certera de Ochoa, en "*El arte de vivir. Un hombre de ciencia: Severo Ochoa"* una producción de RTVE nos encontramos con un documento que es una especie de autorretrato intelectual y vital construido con sus propias palabras.

Para Ochoa, Nueva York fue *medio siglo de vida* y el lugar donde la ciencia y la cultura se entrelazaban sin descanso. Museos, galerías, teatro, música de cámara, ópera. Seminarios y conferencias como las Harvey, esenciales para mantenerse al día en un mundo científico cada vez más vasto. Nueva York aparece como *ecosistema intelectual*, un espacio donde la curiosidad se alimenta continuamente. Asturias sería su origen, su paisaje y formación del espíritu. Sus raíces Villar, Luarca, Gijón lugares donde se formó su sensibilidad y donde comenzó su vocación científica. En sus recuerdos el acantilado escarpado, el Cantábrico cambiante, la verde

montaña, los veranos de estudio y las primeras lecturas científicas. Asturias es para él la realidad primera, el humus espiritual. Ochoa reconoce que su vocación nació de leer a Ramón y Cajal. No aspiraba a repetir su obra —"eso es imposible"—, pero sí a seguir su camino: rigor, curiosidad, ética, dedicación absoluta. Describe la Residencia de estudiantes como un lugar donde no se respiraba: se mascaba cultura. Allí convivían conferencias de Einstein, Marie Curie, música de cámara, debates. Era una élite, sí, pero una élite que España necesitaba multiplicar. Ochoa coincide con Ortega y entiende que la universidad debe difundir y crear cultura. No solo formar profesionales, sino expandir las fronteras del conocimiento. La educación universitaria es necesariamente elitista, pero accesible a todos mediante becas. Sin investigación, una universidad entra en decadencia.

La figura de Carmen Cobián es central. Ella sostuvo su vocación, aceptó el exilio, compartió la vida errante, y fue —dice él— inteligente, culta, bella, profundamente española. Tras su muerte, Ochoa confiesa: "Estoy vacío, oscuro, pero voy donde me lleva el cariño". Ochoa ama profundamente a España, pero la mira con la lucidez de Unamuno: "Me duele España". Critica la falta de apoyo a la ciencia y la cultura, y reclama responsabilidad estatal y privada. Lo que más le llena es haber formado a otros. Sus discípulos, dispersos por el mundo, son su legado más íntimo. Su autorretrato final con el que querría ser recordado es la de ser un hombre "tolerante, comprensivo, bueno, básicamente. Con una ética elevada". Ochoa encarna una forma de vida donde la ciencia es una ética, una estética y una manera de estar en el mundo. Su biografía muestra cómo los mundos invisibles —la bioquímica, la investigación, la curiosidad—

se sostienen sobre mundos igualmente invisibles: el paisaje de la infancia, la cultura, la amistad, el amor y la ética del conocimiento.

## 10.3. Margarita Salas (1938–2019)

Discípula de Ochoa, Margarita Salas Falgueras fue pionera de la biología molecular en España, descubrió la ADN polimerasa del

fago Φ29, fundamental para técnicas de amplificación de ADN. Salas representa la institucionalización de la biología molecular en España y el paso de la "épica fundacional" a la ciencia de laboratorio estable. Nacida el 30 de noviembre de 1938, en *Canero (Valdés, Asturias)* falleció en Madrid a los 80 años. Bioquímica y científica española, especializada en *biología molecular y genética*, Se licenció en Ciencias Químicas y se doctoró en la Universidad Complutense de Madrid, bajo la dirección de Alberto Sols. Trabajó con el premio Nobel Severo Ochoa en Nueva York entre 1964 y 1967. Su experiencia con Ochoa fue decisiva para su trayectoria científica. Estudió *el bacteriófago phi29* y descubrió y caracterizó una ADN polimerasa capaz de amplificar ADN de forma muy eficaz. Esta investigación tuvo importantes aplicaciones en biotecnología, medicina forense, oncología y arqueología.

Fue una figura fundamental en la introducción y desarrollo de la *biología molecular en España*, especialmente desde el Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CSIC-UAM). Ingresó en la RAE (Real Academia Española) en 2003, siendo la primera mujer científica que formó parte de esta institución. Recibió numerosos premios, entre ellos el *Premio Nacional de Investigación Santiago Ramón y Cajal*, la *Medalla Echegaray* y, en 2019, el *Premio al Inventor Europeo.* Es considerada una de las científicas españolas más importantes del siglo XX y un referente para las mujeres en la ciencia. Margarita Salas fue una pionera de la biología molecular española cuyo trabajo sobre la ADN polimerasa del bacteriófago phi29 tuvo gran repercusión científica y biotecnológica.

Es su discurso de ingreso en la Real Academia Española, pronunciado en 2003 nos resume sus ideas e ideales de investigación de forma clara y entendible. Aunque parte de la

genética, no está planteado como un artículo científico especializado, intenta establecer un puente entre el lenguaje humano y el lenguaje contenido en la información genética, utilizando comparaciones, ejemplos y explicaciones accesibles. La propia Salas explicó que evitó hacer un discurso excesivamente científico porque el público de la RAE era muy diverso.

Titula el discurso Margarita Salas “Genética y lenguaje” resultando un libro más cercano a una autobiografía, donde se ve su carácter, sus experiencias, sus lecturas y su manera de entender la ciencia Entre las muchas cosas que dice y de las que puedo comprender están estos párrafos:

“En 1868, un joven médico suizo llamado Friedrich Miescher, aisló un compuesto nuevo de los núcleos de la célula, al que denominó nucleína, hoy día conocido como ácido nucleico. Dos años antes, un monje checo, Gregor Mendel descubrió, mediante experimentos sencillos con guisantes, que la herencia está contenida en muchos genes independientes. Sin embargo, durante mucho tiempo no se vio la conexión entre genes y ácidos nucleicos. Tuvo que pasar cerca de un siglo hasta que, en 1944, el científico americano Oswald Avery, con sus colaboradores, pudo transferir una propiedad heredable de una bacteria a otra utilizando un ácido nucleico puro, demostrando que los genes están formados por ácido desoxirribonucleico (ADN). Los ácidos nucleicos son moléculas de una gran longitud cuya estructura muestra una serie de regularidades, estando formados por un número limitado de piezas más pequeñas, conocidas como nucleótidos y abreviadas como A, C, T, y G. Si comparamos un ácido nucleico con un lenguaje, las piezas del ácido nucleico serían las letras del alfabeto del lenguaje. Con esta analogía podemos decir que el lenguaje de los ácidos

nucleicos en la célula escribe nuestros caracteres hereditarios. Es decir, nos dice, por ejemplo, si nuestros ojos y los de nuestros hijos son azules o marrones.

Pero también existe un segundo lenguaje en nuestras células, el de las proteínas, escrito en el alfabeto propio de estas moléculas. Cada célula contiene miles de proteínas que realizan las reacciones químicas que se necesitan para la vida del organismo. La síntesis de cada proteína está dirigida por un ácido nucleico determinado. Así, el alfabeto de los ácidos nucleicos determina el alfabeto de las proteínas, siendo la clave genética el diccionario que nos da la traducción de un alfabeto al otro. Cuando se descifraron los jeroglíficos, los arqueólogos hicieron uso de la Piedra de Roseta que contiene el mismo alfabeto escrito con letras griegas y egipcias. En teoría, se podría usar el mismo método para descifrar la clave genética comparando la estructura química de un determinado ácido nucleico con la de la proteína correspondiente, letra a letra. Sin embargo, esto no es posible. En 1961, Marshall Nirenberg llegó a una solución ingeniosa del jeroglífico: construyó un sistema in vitro utilizando un ácido nucleico que tenía las instrucciones para la formación de una proteína. Este sistema puede compararse con una máquina traductora que se alimenta con una frase escrita en el alfabeto de los ácidos nucleicos y que se traduce al alfabeto de las proteínas. Nirenberg utilizó un ácido nucleico muy simple, formado por una cadena con una sola letra repetida. El sistema produjo una proteína que también contenía una sola letra, escrita en el alfabeto de las proteínas. De esta manera, se descifró el primer jeroglífico y se mostró cómo puede usarse la maquinaria de la célula para la traducción de la clave genética. El trabajo posterior del propio grupo de Nirenberg, del grupo de Severo Ochoa y del grupo de Gobind

Khorana dio como resultado el conocimiento completo de la clave genética. Se estableció que la clave genética es triplete; es decir, tres letras en el ácido nucleico determinan un aminoácido en la proteína. Teniendo en cuenta las cuatro letras en el alfabeto de los ácidos nucleicos, existen 64 tripletes posibles. Se demostró que 61 de ellos tienen la información para codificar algún aminoácido, siendo los tres tripletes restantes sin sentido, es decir, no tienen información para codificar a aminoácido alguno. Puesto que el número de aminoácidos que se encuentran presentes en los organismos es 20, la existencia de 61 tripletes implica que la clave genética está degenerada, es decir que un aminoácido puede ser determinado por más de un triplete".

Los datos recientes obtenidos a raíz de la secuenciación del genoma humano indican la existencia de unos 40-50.000 genes. Sin embargo, debido al procesamiento antes indicado, el número de proteínas codificadas por esos genes puede ser hasta cinco veces mayor. Es decir, en el genoma humano, un gen puede codificar hasta cinco proteínas distintas. Una característica fundamental del lenguaje de la genética es su fidelidad. A la vez que la célula paterna se divide en dos células hijas el ADN de las células debe replicarse exactamente de acuerdo con las reglas establecidas en 1953 por James Watson y Francis Crick al determinar la estructura en doble hélice del ADN, en la cual la A aparea con la T y la G con la C. Los errores en esta replicación son mínimos; ello, debido a una serie de mecanismos correctores que reducen las posibilidades de error a uno en cada diez millones de nucleótidos. Incluso entonces, existen mecanismos de supervisión y mantenimiento, que son las enzimas de reparación del ADN, que identifican el error y lo reparan. Se calcula que, de esta forma, se corrigen un 99,9 por ciento de los

errores que se cometen en la replicación del ADN. De nuevo, podemos comparar estos mecanismos con los procesos que tienen lugar en la edición de un texto. En principio, se cometen pocos errores, pero, cuando ocurren, el proceso de corrección de pruebas elimina la mayor parte de ellos.

¿Qué ocurre cuando en el proceso de replicación del material genético se produce un error que no es corregido? Debido a la degeneración de la clave genética, es decir, al hecho de que un aminoácido puede ser codificado por más de un triplete, puede ocurrir que la mutación sea silenciosa y no dé lugar al cambio de un aminoácido por otro en la proteína correspondiente. También puede suceder que, habiendo cambio de aminoácido éste no altere la función de la proteína. Finalmente, la mutación puede originar un cambio de aminoácido que dé lugar a una proteína no funcional produciendo alteraciones que, en algunos casos, originan determinadas enfermedades. También existen enfermedades humanas debidas a que los genes contienen mutaciones en los exones que afectan el procesamiento del pre-mARN.

Otro de los temas generales del discurso de Salas es el lenguaje. Dice la científica:

“El lenguaje es la capacidad que tienen los humanos para usar palabras y combinarlas en frases de forma que puedan comunicar ideas a otras personas. También, de modo inverso, es la comprensión de las palabras emitidas por otras personas para convertirlas en conceptos en nuestras mentes. Existen también otros tipos de lenguaje, como el lenguaje por señas, a través de gestos manuales y faciales, que utilizan las personas sordas para comunicarse. Así pues, el lenguaje es la capacidad de transformar ideas en señales y debe distinguirse de otras capacidades como el

pensamiento, o la capacidad de leer y escribir. El pensamiento es la capacidad de tener ideas y de inferir nuevas ideas de las anteriores. El lenguaje es la capacidad de transformar ideas en señales para comunicarse con otros. Pero el lenguaje es distinto de las ideas. Las personas no piensan solo en las palabras y frases de su lenguaje; el pensamiento puede ocurrir en ausencia de lenguaje. Los niños, las personas afásicas y los humanos adultos normales piensan cuando usan imágenes visuales, conceptos abstractos y otras formas no lingüísticas de pensamiento. Por otra parte, el lenguaje debe distinguirse de la capacidad de leer y escribir. El lenguaje escrito es un invento reciente en la historia de la humanidad y tiene que enseñarse de un modo explícito, con resultados desiguales. Sin embargo, en los comienzos, no existía el lenguaje. El lenguaje apareció en la evolución sólo cuando los humanos y las especies anteriores a ellos fueron capaces de generar y categorizar acciones, y de crear y categorizar representaciones mentales de los objetos, acontecimientos y relaciones.

De un modo similar los cerebros de los niños representan y evocan conceptos y generan múltiples acciones mucho antes de que puedan expresar su primera palabra correctamente seleccionada, y aún mucho antes de que formen frases y usen realmente el lenguaje. Sin embargo, la maduración de los procesos de lenguaje puede no depender siempre de la maduración de los procesos conceptuales puesto que muchos niños con sistemas conceptuales defectivos son capaces de adquirir el lenguaje. Así pues, la maquinaria neurológica necesaria para algunas operaciones sintácticas parece capaz de desarrollarse de un modo autónomo. En la segunda mitad del siglo XX se progresó de un modo espectacular en el conocimiento del lenguaje de la genética, es decir cómo se traduce la información

contenida en el ADN para dar lugar a las proteínas. Sin embargo, aún quedan preguntas importantes para las que todavía no existe respuesta. Una de ellas es entender las reglas que traducen una secuencia lineal de aminoácidos en las proteínas a una forma tridimensional con una función específica. Asimismo, el entender las reglas del procesamiento de los ARN mensajeros para dar lugar a proteínas distintas, o las complejas redes de regulación en la expresión de los genes. La investigación que se está realizando en estas áreas debe llevar, en un futuro próximo, a una respuesta a muchas de las preguntas relacionadas con el lenguaje de la genética. El progreso de la comprensión del lenguaje es importante para el avance del conocimiento básico, y es indispensable para el tratamiento de los pacientes con distintos tipos de desórdenes del lenguaje y con afasia. Sin embargo, la asombrosa proeza del lenguaje es demasiado compleja para ser comprendida con las herramientas de una única especialidad académica o médica. Sin duda, la contribución de varias disciplinas al estudio de los procesos neuronales fundamentales puede dar lugar a importantes avances en el futuro que nos permitan responder a las numerosas preguntas aún existentes relacionadas con el lenguaje y su genética".

# 11. EPILOGO.

Este libro podría no acabar nunca. Hay tantos mundos invisibles en los campos de la ciencia que me siento avergonzado de tanta osadía por haber empezado algo imposible, ya que solo podemos imaginar la simple epidermis del universo. Al final me siento satisfecho de haber podido leer textos hermosos sobre misteriosos secretos del universo y en especial del ser humano, aunque muchas de las cosas no las entienda por su complejidad en la terminología y en las ideas que pretenden trasmitir. También tengo que confesar y se puede ver en casi todo este libro que han abundado los investigadores extranjeros, dejando muy disminuidos nuestros investigadores españoles. La culpa solo la tiene mi ignorancia o falta de inteligencia que no supo de los grandes hombres y mujeres de la investigación. Me ocurrió lo mismo cuando empecé a escribir sobre el protestantismo en España del siglo XVI. Los grandes autores, los que representaban la máxima autoridad en las letras habían dicho barbaridades sobre el protestantismo español del XVI. Menéndez Pelayo, además de considerar la Reforma “episodio” sin importancia, niega la importancia de los hombres de la Reforma. Así hacía constar Menéndez Bejarano considerando al protestantismo de la Reforma “salpicaduras que no respetaron la blanca veste de la ortodoxia hispánica”. También Ortega y Gasset dice que no hubo ningún protestante importante que quemar. Que solo Servet fue un hombre destacable, pero lo quemó Calvino. Sin embargo, aunque no lo quieran reconocer, la Reforma en España, no solo son cenizas que el viento las lleva, sino que las huellas de muchos reformadores y reformados han quedado impresas en muchos lugares de la cultura

y la piedad española. Werner Thomas había considerado que el número de españoles procesados estaría en torno a 500, mientras yo hacía referencia de más de 1500 españoles reformados que por su nobleza y costumbres arrastraban tras de su persona mucha servidumbre creyente para su causa. Hoy sabemos que el protestantismo español representa el impulso renovador más importante de la historia espiritual de España. Posiblemente, en proporción, hubo más protestantes en la España del siglo XVI que en la actualidad.

Por esta causa no quería dejar de nombrar y enumerar resumidos sus logros de algunos de los grandes investigadores españoles. *Juan Carlos Izpisua Belmonte* (1960–) es uno de los investigadores en biología del desarrollo y medicina regenerativa. Aporta trabajos sobre reprogramación celular, envejecimiento y edición genética. Su investigación sobre rejuvenecimiento parcial mediante factores de Yamanaka abre debates filosóficos sobre límites biológicos y ontológicos. María Blasco Marhuenda (1965– ) Directora del CNIO[47]. Especialista en telómeros y envejecimiento. Ha demostrado relaciones entre longitud telomérica, cáncer y longevidad. Su trabajo ofrece una vía biológica rigurosa para pensar la temporalidad celular y la “finitud programada”. Ginés Morata Pérez 19 de abril de 1945) es un biólogo español, genetista del desarrollo, especialista en *Drosophila*. Descubrimientos sobre compartimentos celulares y control del crecimiento. Morata es clave para entender

[47] El Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO) no cuenta actualmente con una directora fija tras el cese de María Blasco en enero de 2025. La dirección científica la ocupa de forma interina Fernando Peláez (como director científico en funciones) y la gerencia está a cargo de Cristina Navarro Enterría, tras la renuncia del designado Raúl Rabadán antes de asumir el puesto.

cómo la forma y la identidad celular emergen de reglas internas, algo que dialoga con tus intereses sobre complejidad irreducible.

Podríamos citar otros autores sobre historiografía de la biología molecular como *José María López Piñero* historiador de la ciencia, con trabajos sobre la recepción de la biología moderna en España. Francisco J. Ayala aunque desarrolló su carrera en EE. UU, es español de origen y figura central en genética evolutiva y bioética. Sin embargo, ya nos saldríamos de la idea propuesta de relatar las investigaciones de los mundos invisibles. Siguiendo las líneas generales que Judson va describiendo en su libro The Eighth Day of Creation (El octavo día de la creación) nos dice que llamar "revolución" a todo cambio científico del siglo XX ya no sirve: hubo demasiados. Por otra parte, considera que la biología molecular no nació de golpe, sino como una transformación lenta en la forma de pensar. Antes, casi todos los científicos creían que los genes eran proteínas. Oswald Theodore Avery Jr descubre algo sorprendente: el ADN puede cambiar la herencia de una bacteria. Esto desconcierta a todos, porque el ADN se consideraba una molécula "simple", incapaz de especificidad. El descubrimiento no fue ignorado: los grandes genetistas sí lo entendieron, pero con cautela. El problema era conceptual: aceptar que una molécula tan "aburrida" pudiera contener información.

Erwin Chargaff demuestra que el ADN no es repetitivo: tiene proporciones específicas de bases. Eso abre la puerta a Watson y Crick, que dan forma física a esa especificidad con la doble hélice. Para Judson, lo decisivo no es la estructura del ADN, sino *el cambio en lo que los científicos consideraban una explicación válida*. Así pues, la biología molecular nació cuando los científicos se dieron cuenta de que la vida podía explicarse con moléculas que tenían

“significado”, no solo estructura. La vida dejó de ser misterio y empezó a ser lenguaje y la célula es, sin duda, uno de los descubrimientos más fascinantes de la ciencia: un universo diminuto y autorregulado que constituye la base de toda forma de vida conocida. Adentrarse en su mundo es comprender cómo funcionamos, cómo nos enfermamos y cómo se origina la complejidad de los organismos. Todo ser vivo —desde una bacteria microscópica hasta una ballena azul, pasando por cada planta y cada ser humano— está compuesto por células. La teoría celular, formulada en el siglo XIX gracias a los trabajos de Schleiden, Schwann y Virchow, sentó las bases de la biología moderna, donde los seres vivos están formados por células. La célula es la unidad estructural y funcional de los organismos y toda célula proviene de otra célula preexistente.

El descubrimiento de la célula se remonta a 1665, cuando Robert Hooke observó por primera vez en un microscopio casero las "celdillas" de una lámina de corcho. Pero lo que Hooke vio eran solo paredes celulares vacías. La verdadera revolución llegó con Anton van Leeuwenhoek, quien describió células vivas y móviles, abriendo la puerta a un mundo invisible completamente nuevo. Quien mira por un microscopio y comprende lo que ve nunca vuelve a mirarse a sí mismo de la misma manera, porque sabe que cada pensamiento, cada latido y cada respiración son el resultado del trabajo coordinado de billones de pequeños universos celulares. Esta frase sugiere una profunda reflexión sobre la humildad y la interconexión porque nos enseña que somos parte de un vasto sistema vivo. Al entender la complejidad de nuestras células, cambiamos nuestra perspectiva y dejamos de sentirnos solos o aislados del resto de la naturaleza. Mirar la vida desde lo más pequeño cambia cómo nos vemos. Cada

parte de nuestro cuerpo trabaja en equipo como un gran universo. La ciencia nos muestra la belleza oculta dentro de nosotros. La filosofía de la ciencia aborda esta frase desde la epistemología y la ontología, transformando un simple dato biológico en una revolución sobre cómo entendemos nuestra propia existencia.

Cuando pasamos del lente del microscopio a la reflexión filosófica, surgen varias cosas que nos muestran cómo la suma de billones de células (unidades simples) da lugar a la consciencia y la vida (propiedades complejas emergentes). El instrumento (microscopio) no solo amplía la vista, sino que altera la verdad percibida y destruye el antropocentrismo egocéntrico. Cuestiona la identidad única, sugiriendo que no somos un solo individuo, sino una colonia masiva de organismos interdependientes. Thomas Kuhn[48] fue uno de los filósofos de la ciencia más importantes del siglo XX, famoso por cambiar radicalmente nuestra forma de entender cómo progresa el conocimiento científico. Antes de él, se creía que la ciencia avanzaba de forma lineal y acumulativa, sumando un dato tras otro. Kuhn demostró en su libro *La estructura de las revoluciones científicas (1962)* que la ciencia avanza a saltos, mediante revoluciones que cambian por completo nuestra visión del mundo. Los científicos trabajan bajo un paradigma actual, que es el modelo o "las gafas" con las que miran y explican la realidad (por ejemplo, creer que la Tierra es el centro del universo). Cuando aparecen nuevos descubrimientos o misterios que el modelo actual no puede explicar surge una crisis. Las anomalías se acumulan, el modelo actual se rompe y los científicos empiezan a dudar de lo que daban

[48] Thomas Samuel Kuhn fue un físico, filósofo de la ciencia e historiador estadounidense, conocido por su contribución al cambio de orientación de la filosofía y la sociología científica en la década de 1960

por sentado. Surge un nuevo paradigma (un nuevo modelo) que lo cambia todo. La transición a este nuevo modelo es una revolución.

El microscopio es el ejemplo perfecto de un invento que provocó un cambio de paradigma kuhniano. Antes de él, el ser humano se veía a sí mismo como una unidad indivisible y aislada. Al mirar por el lente, el viejo paradigma se derrumbó: descubrimos que somos un ecosistema de billones de células vivas. La realidad no cambió, pero cambió nuestra forma de interpretar la realidad. Los cambios históricos de ver las cosas podemos verlos en el paso de la física de Newton a la Einstein, En la filosofía de la ciencia de Thomas Kuhn, la inconmensurabilidad es la imposibilidad de comparar dos paradigmas científicos de forma directa o neutral porque no existe un lenguaje ni un estándar común para medirlos. Cuando ocurre una revolución científica, el nuevo paradigma no es simplemente "mejor" o "más verdadero" que el anterior; es un universo conceptual completamente distinto. Kuhn explicaba que dos científicos que trabajan en paradigmas diferentes (por ejemplo, uno antes y otro después de una revolución) no pueden entenderse plenamente debido a la *inconmensurabilidad lingüística*. Las mismas palabras significan cosas distintas. Para Isaac Newton, la masa era fija y absoluta; para Albert Einstein, la masa cambia con la velocidad. Usan el mismo término, pero hablan de conceptos diferentes. Lo que se considera un "problema científico válido" o una "buena solución" cambia en poco tiempo. El tipo de preguntas que hacían los alquimistas del siglo XVII dejaron de tener sentido para los químicos del siglo XIX. Los científicos ven mundos diferentes al mirar lo mismo. Un astrónomo antiguo miraba al cielo y veía planetas girando alrededor de una Tierra inmóvil; un astrónomo moderno ve a la Tierra moviéndose alrededor del Sol. Su interpretación visual de la realidad

ha cambiado por completo. Un ejemplo visual. Imaginemos que intentamos medir el peso de un objeto usando una regla de medir distancias. No puedes, porque los sistemas de medida no son compatibles. No puedes usar las reglas, las leyes y el vocabulario de la física cuántica moderna para juzgar o validar la física de Aristóteles. Cada una funciona dentro de su propio "juego" y bajo sus propias reglas.

# 12. ANEXO I: La chispa invisible: el electrón

La electricidad en la segunda mitad del siglo XIX, se había popularizado tanto que había llegado a ser un término sacado del ámbito de lo científico y ser usado por la gente común.[49] Sin embargo, el conocimiento teórico de cómo funcionaba era inconcluso y se mantenía retrasado respecto al desarrollo tecnológico experimentado. Solo añadir que hoy sin electricidad el mundo actual sobreviviría malamente. Desde finales del XVIII los trabajos de Charles A. Coulomb, a finales del siglo XVIII, se conocía la carga eléctrica como una propiedad que pueden adquirir ciertos cuerpos, que podía presentarse con dos polaridades opuestas. Esta propiedad podía dar lugar a fenómenos estáticos -repulsión o atracción de cuerpos cargados eléctricamente- o de carácter dinámico -paso de un fluido a través de sustancias llamadas conductoras de electricidad-. Posteriormente, Hans C. Oersted demostró la interacción entre una corriente eléctrica y una sustancia magnetizada, siendo Ampère y, sobre todo, Michael Faraday quienes estudiaron en profundidad tales flujos eléctricos, concluyendo Faraday con el concepto capital de campo eléctrico para explicar las interacciones entre conductores y su comportamiento similar a la interacción gravitacional, aunque en este caso existiera además una distinción en función de la polaridad.

Y, por supuesto, no hay que olvidar el trabajo de James C. Maxwell, seminal para la moderna electrodinámica, que consiguió tratar conjuntamente los campos eléctricos y magnéticos tanto

[49] *Del electrón al chip*. Gloria Huertas Sánchez, Luisa Huertas Sánchez, José L. Huertas Díaz

estática como dinámicamente. A mediados del siglo XIX se conocían los procedimientos para generar electricidad, distinguir entre la corriente continua y alterna de baja frecuencia, se había aprendido a forzar oscilaciones de alta frecuencia, se estaban estudiando las descargas eléctricas en gases enrarecidos, se empleaba la electricidad para aplicaciones tan impactantes en la época como la telegrafía y la telefonía o la radio, se había desarrollado un cuerpo de doctrina que condujo a considerar de manera unificada los fenómenos eléctricos y magnéticos, pero se desconocía quién transportaba la carga eléctrica, incluso qué era finalmente esa carga. No fue hasta que J. J. Thomson llevo a cabo sus experiencias sobre los rayos catódicos que se pudo desentrañar el misterio. En efecto, en 1897, en una serie de experimentos destinados a estudiar la naturaleza de las descargas eléctricas en un tubo de rayos catódicos en el que se había hecho un alto vacío, Thomson interpreto la desviación de estos rayos ante campos eléctricos y magnéticos como la evidencia de que tales rayos estaban formados por un haz de partículas muy pequeñas a las que calculó un alto valor para la relación carga a masa. Posteriormente, estimó el valor de la propia carga de estas partículas.

Antes de Thomson era creencia generalizada que los rayos catódicos eran, como la luz, algo inmaterial. Una hipótesis opuesta sostenía que podían estar formados de partículas, pero no había sido posible determinar su naturaleza ni su tamaño. Los experimentos de Thomson estaban basados en una intuición muy sencilla: si esos rayos estaban ocasionados por partículas materiales, estas deberían estar eléctricamente cargadas y, por tanto, sufrirían una desviación en presencia de un campo eléctrico o magnético. Por otra parte, Thomson añadió un pequeño molinete en el interior del tubo,

observando que los rayos hacían que girase, lo que condujo al científico a pensar que los rayos catódicos debían estar formados por unos corpúsculos -nombre inicial que dio a los electrones- con masa. Por otro lado, la carga de estas partículas debía de ser negativa por la manera en que se comportaban ante campos electromagnéticos. Lo interesante es que a partir de esa demostración cualitativa fue muy sencillo establecer una relación entre la masa de esa partícula y su carga eléctrica. Dado que el experimento era igualmente válido si, en lugar de un campo eléctrico, se empleaba un campo magnético, Thomson repitió la experiencia en ambos casos. De esa forma, si se ajustaban de manera que la deflexión del haz de rayos era la misma, es posible establecer un conjunto de ecuaciones que permite calcular esa relación.

Pero Thomson fue más allá. Cambió la sustancia de que estaban formados sus terminales eléctricos -ánodo y cátodo- y constató que el fenómeno no sufría alteraciones en función del elemento químico empleado. Concluyó así que estos corpúsculos se encontraban en todos los átomos y tenían las mismas propiedades físicas. El cálculo del coeficiente carga/masa de esta partícula constituyente de todos los átomos permitió establecer que este cociente viene a ser unas dos mil veces más pequeño que el correspondiente al átomo de hidrógeno y, por ende, llegar a la conclusión de que esta partícula es mucho más pequeña que el átomo más pequeño. La primera partícula subatómica -el electrón- había sido descubierta y se había podido medir la relación entre su masa y su carga. Aunque Thomson estableció la relación entre masa y carga con bastante precisión y concluyó que los electrones forman parte del átomo, su modelo atómico en el que los electrones orbitaban en medio de una masa de carga positiva se demostró

pronto como incorrecto, a partir de los estudios de Ernest Rutherford. Las consecuencias prácticas inmediatas del descubrimiento del electrón fueron escasas si no nulas. Los físicos competían por dilucidar las bases elementales de la materia y se centraron en establecer el papel de esta partícula en el átomo tratando de desentrañar la estructura íntima de este último.

En cuanto al empleo del efecto Edison en comunicaciones, no tuvo tampoco consecuencias inmediatas, pese a que el comportamiento observado podría haber inducido la idea de emplearlo en aplicaciones de demodulación de las señales moduladas en amplitud que, en aquel momento, eran las empleadas en la naciente radiocomunicación. No habría de ser hasta 1904 cuando John A. Fleming comprendiera el interés práctico derivado del efecto Edison y patentara la primera válvula o tubo de vacío. Se trataba de un diodo basado en el efecto Edison y empleado como rectificador. Consistía en una ampolla de vidrio con dos electrodos; uno de ellos, el cátodo, podía calentarse para emitir electrones que alcanzaban el ánodo y cerraban así un circuito eléctrico. Esto permitía rectificar corrientes alternas, dejando pasar solo los semiciclos positivos, es decir, aquellos en que el electrodo caliente estaba realmente conectado como negativo. Sin embargo, sería en 1906 cuando Lee de Forest aplicará estas ideas a la invención de su *audión,* la primera válvula o tubo de vacío con capacidad de amplificación; hay que mencionar que el mismo año, el austriaco Robert von Lieben había ideado un dispositivo similar. En ambos casos no se hizo realmente el vacío en la ampolla de vidrio que contenía los electrodos, sino que se rellenó con vapor de mercurio.

Otro aspecto crucial en estas comunicaciones fue la introducción del concepto de modulación de amplitud. En efecto,

dado el corto alcance que la transmisión directa de señales radioeléctricas tenía, pronto se buscaron alternativas. Lo que llamamos transmisión directa no es más que convertir el sonido a una señal eléctrica por medio de un micrófono, transmitirla y luego volver a transformarla en señal acústica para que actúe sobre un altavoz. La transmisión directa de una señal radioeléctrica, tanto por cable como por el aire, sufre una atenuación importante, como ya hemos dicho. Esa atenuación es tanto mayor cuanto menor es la frecuencia de la señal; dado que las señales con las que nos comunicamos -por limitaciones del oído humano- están entre 100 Hz y 20 KHz, sufren mucho de este fenómeno. En cambio, si se emplean algunas técnicas de procesado de la señal, esa atenuación se puede hacer mucho menor. La idea es simple: usar una señal de frecuencia fija y mucho más alta, llamada portadora, y hacer que su amplitud, es decir, su valor, varie en función de la información que se quiere transmitir, la señal moduladora; la onda resultante o modulada es transmitida y, debido a que su frecuencia es mayor, la atenuación se reduce.

Esta fue la primera técnica, introducida por Reginald Fessenden en 1900, que perduró durante las primeras tres décadas del siglo XX. Sin embargo, seguían existiendo problemas importantes. Emitir con una potencia suficiente seguía siendo un problema que no se resolvería hasta que Armstrong comprendiera la utilidad del triodo como amplificador, cosa que vino a ocurrir en 1912 cuando él y Alexander Meissner, independientemente, aplicaron por primera vez el concepto de realimentación positiva y concibieron un oscilador capaz de proveer señales sinusoidales de suficiente energía y estabilidad. Todo esto hasta la llegada del transistor que ha sido la gran revolución tecnológica de comunicación por cable. Aunque no me considero un experto en estos temas, reconozco que

la galena ya fue un paso importante en este mundo apasionante de la comunicación. La galena llenó de encanto mis noches juveniles donde Alberto Oliveras presentaba "*Ustedes son formidables*" y yo lo escuchaba en una *galena* con un cable conectado a la tubería de cobre de mi lavabo y en el otro polo enrollado a mi dedo. Era todo muy simple, pero todos estos pasos en la electrónica ya hacían prever este mundo invisible, interconectado por las ondas.

# 13. ANEXO II. El transistor

El transistor es un dispositivo de conmutación y amplificación que funciona gracias a la física cuántica aplicada a los materiales semiconductores. La mecánica cuántica explica cómo los electrones en un sólido se agrupan en bandas de energía (banda de valencia y banda de conducción) separadas por una banda prohibida o gap. Mediante el proceso de dopaje (añadir impurezas), se modifican estos niveles cuánticos para permitir o bloquear el flujo de electrones a voluntad. En transistores ultraminiaturizados de pocos nanómetros, los electrones pueden atravesar barreras de potencial mediante el efecto túnel cuántico, un fenómeno que desafía la física clásica.

Pablo Arias, físico, considera que hablar de la radio es hablar del transistor.[50] “En primer lugar, destacar que el transistor ha sido con seguridad el mayor avance que ha tenido la humanidad e los últimos cien años. Y también es el avance y origen de la creación de una nueva rama científica y tecnológica y que está presente en todos los órdenes de nuestra vida. Hoy no hay artilugio y aparato que no lo lleve un transistor. Hablamos del transistor, pero cuando estamos hablando del origen de la radio, hay que decir que al principio los aparatos de radio de emisión y recepción no llevaban transistores. El transistor es un dispositivo. Llevaban unas lámparas, los que tengan alguna radio antigua, un televisor antiguo, verán que eran una especie de bombillas que tenían diferentes salidas y que lo que proporcionaba eso era a un circuito eléctrico darle señal de amplificación, es decir, hacía una señal más grande o bien de

[50] *Historia de la ciencia 2.0*. Pablo Arias. Cadena SER

corrección, cada una era para una cosa, corregía tensiones y equilibraba todo. Y esas lámparas fueron sustituidas por el transistor.

En 1938, William Sockley de los laboratorios B estaba tras la idea de sustituir las funciones amplificadoras y reguladoras de las válvulas, esas válvulas, lámparas que se llaman válvulas termoiónicas. En la naturaleza tenemos materiales que los denominamos conductores, es decir, que permiten el paso de la energía eléctrica, que no es ni más ni menos que una conducción de electrones. Tenemos conductores, tenemos aislantes, los que no lo permiten, y tenemos semiconductores. Hay otra cuarta categoría que es superconductores. El caso es que dentro de los conductores tenemos la mayoría de los metales, dentro de los aislantes podemos tener la madera, el plástico, muchísimos materiales y los semiconductores son redes cristalinas. Tenemos el silicio, tenemos el galio y demás. Y el semiconductor en algunas condiciones permite el paso de la corriente y en otras no. ¿Para qué nos sirve esto? Pues nos sirve para en un circuito electrónico, que es un circuito lógico, permita o no que pase tensión. De tal manera que, en este proyecto, a base de unir diferentes tipos de semiconductores, (no voy a profundizar) pues a ese proyecto no le terminaban de salir las cosas al bueno de William Shockley y se introdujeron otros dos personajes que les debemos la creación del transistor en 1947 que son John Bardin y Walter Bayen. Entre los tres no le salían las cosas a la primera, pero aparecieron nuevas ideas y fueron capaces de crear el transistor, que se usa para amplificar una señal. La señal que recibimos de una emisora de radio tiene una amplitud muy pequeñita, con eso no seríamos capaces de oír nada. Los transistores colocados en un circuito hacen que esa señal aumente y sea capaz de poderla oír con nuestros oídos que nosotros. La parte matemática de cómo

debía ser un transistor estaba muy avanzada. Lo que era difícil era crearlo físicamente, es decir, estar en un laboratorio, unir las diferentes partes, porque en los semiconductores hay una cosa que si no se dopan (introduciendo diferentes elementos del del semiconductor) no funcionan. En este caso se doparon los semiconductorres con oro.

El primer transistor[51] que hicieron es aproximadamente como una uña del dedo meñique de uno de nosotros. Eso pareció un gran avance hasta que la fábrica de *Intel Corporation* produjo en 1971 el Intel 4004 que aunque era de 4 bits solamente y tenía 2,300 transistores. No creo que nos imaginemos 2,300 uñas puesta puntas, ¿no? Porque fuimos capaces de hacerlo cada vez más pequeño. Pero como anécdota te puedo decir que mi catedrático de electrónica, el ya desaparecido profesor Alberto Bailon Vega, me decía que cuando él era estudiante nunca imaginó la evolución vertiginosa que iba a tener la integración de transistores en un dispositivo como en un microprocesador. Ahora mismo de los 2300 transistores que tenía el primer microprocesador, ahora un micro procesador de 64 bit tendrá unos 700 millones de transistores. El aparato, el teléfono móvil que tenemos nosotros ahora, tendrá alrededor de unos 200 millones de transistores, quizás. El transistor es pues el ladrillo básico de toda la electrónica moderna desde un LED hasta los miles de millones de transistores dentro de un procesador.

La analogía más clara es la del grifo de agua: a la entrada el agua llega con presión de la corriente principal, a la salida el agua fluye hacia fuera y al lugar que apuntes con la manguera y con la

[51] *Del electrón al chip*. Gloria Huertas Sánchez, Luisa Huertas Sánchez, José L. Huertas Díaz

llave la giras para abrir o cerrar el paso. En el transistor una pequeña señal en la llave controla una corriente mucho mayor entre entrada y salida. Pero detrás del grifo de agua, tenemos que ver el transistor como algo cargado de electrones como ondas de probabilidad. Es energía cuantizada y su movimiento depende de bandas electrónicas creadas por el material semiconductor, un material diseñado para manipular estados cuánticos. En un metal, los electrones se mueven libremente. En un aislante, están atrapados. Un semiconductor (silicio, germanio) está justo en medio: sus electrones pueden moverse solo si reciben la energía adecuada. El transistor controla el flujo manipulando esa brecha cuántica.Cuando aplicas un voltaje a la "puerta" (gate), no estás empujando electrones como quien empuja canicas. Estás modificando la estructura cuántica del material. Cambias la probabilidad de que los electrones salten a la banda de conducción. Creas o destruyes un "canal" cuántico por donde pueden moverse. Alteras la densidad de estados disponibles para los electrones. El transistor abre o cierra porque cambia las condiciones cuánticas del canal. "Un transistor no abre ni cierra un camino físico, sino un camino de probabilidades. La corriente fluye cuando las condiciones cuánticas del material permiten que los electrones existan en un estado donde moverse es posible." Esta frase captura la esencia: no se controla materia, se controla posibilidad.

Aquí nos metemos en un terreno propicio para el filósofo y el matemático y ninguna de las dos cosas tengo. Pero no deja de ser curioso que se manipule la posibilidad, lo invisible como los estados cuánticos, las funciones de onda etc. Además, lo invisible sostiene a lo visible como la corriente, el encendido, la computación, etc. La clave es que *lo material no es tan material como parece*. Y ahí es donde la metáfora se vuelve legítima, no decorativa. Lo cuántico es

real, pero no es palpable. La mecánica cuántica describe cómo se comporta la materia en escalas donde la intuición humana deja de funcionar. No es una teoría "mística": es la base de tecnologías que usamos cada día: láseres, resonancias magnéticas, LEDs, transistores, GPS (correcciones relativistas y cuánticas). Pero, aunque es real, *no es visible*. No puedes "ver" una función de onda, ni "tocar" una banda de energía. Solo ves sus efectos. Por eso, cuando hablamos de cuántica, *siempre estamos traduciendo* de un mundo matemático a un mundo humano. Un transistor es un trocito de silicio. Eso es material, palpable, mensurable. Pero lo que hace que funcione —que conduzca o no conduzca— depende de estados cuánticos, probabilidades, túneles, densidades de estados, bandas electrónicas. Es decir, depende de algo que no se puede ver directamente. Por eso, cuando usamos "metáfora filosófica", no estoy diciendo que el transistor sea simbólico, sino que queremos decir que su funcionamiento obliga a pensar en términos que *no son puramente mecánicos.*

La metáfora aparece porque la realidad cuántica es ininteligible sin imágenes. La cuántica funciona, pero no se puede explicar sin metáforas como "pozo de potencial" "barrera" "túnel" "nube de probabilidad" "canal" "bandas". Nada de eso existe como objeto físico. Son imágenes mentales para describir ecuaciones. El transistor, aunque sea un objeto físico, vive en ese mundo de imágenes. La metáfora filosófica no es adorno: es puente. Cuando decimos que un transistor es "arquitectura de probabilidades", no estamos haciendo poesía, estamos describiendo literalmente lo que ocurre. No se abre un canal físico, se abre un estado cuántico donde es probable que los electrones se muevan. La metáfora es necesaria porque la realidad cuántica no cabe en el lenguaje cotidiano. Lo

filosófico surge porque lo cuántico cuestiona nuestra idea de materia. La física clásica decía que la materia es lo que ocupa un lugar en el espacio y tiene propiedades definidas. La cuántica dice que la materia es un conjunto de estados posibles, cuya realización depende de condiciones invisibles. Eso es filosóficamente inexplicable. El transistor es un ejemplo cotidiano de esta revolución: un objeto que funciona no por su forma, sino por la estructura de posibilidades que contiene. “El transistor es un objeto material cuya función depende de lo inmaterial: estados cuánticos que no se ven, pero que determinan lo que puede suceder. Es un recordatorio de que la materia, en su raíz, es menos cosa y más posibilidad.

Aquí tendríamos que esforzarnos en explicar que la cuántica no es “azar”: es un espacio de posibilidades. Durante décadas se ha explicado la cuántica como “azar”, “indeterminación”, “ruido”, “incertidumbre”. Eso es una simplificación pobre. La cuántica no dice que “todo es azar”. Dice que la realidad está hecha de posibilidades que se actualizan bajo ciertas condiciones. Es decir, antes de que algo ocurra, hay un abanico de posibilidades reales, no imaginarias, no metafóricas: reales, y la física describe cómo esas posibilidades se transforman en hechos. Por eso posibilidad es más amplio que azar. El azar es solo una forma de describir cómo se elige entre posibilidades. La materia cuántica no es “cosa”: es un conjunto de estados posibles. Cuando decimos que un electrón “está aquí o allá”, en realidad estamos diciendo: El electrón puede estar aquí o allá, y su presencia en cada lugar tiene una probabilidad definida. La palabra clave es puede. La cuántica describe lo que puede ser, no solo lo que es. Por eso, cuando miras un transistor, aunque sea un objeto sólido, su funcionamiento depende de estados posibles, canales posibles, energías posibles, movimientos posibles. La

materia, en su raíz, es posibilidad organizada. Así parece entenderse mejor la cuántica. Lo que ocurre es que la cuántica se ha explicado durante un siglo con un lenguaje que confunde más de lo que aclara y debemos pensar la cuántica en términos de posibilidad.

La física clásica decía, como en mi pueblo dicen los campesinos, que la realidad es lo que es. La cuántica dice que la realidad es lo que puede ser, y bajo ciertas condiciones se vuelve lo que es. Esto abre un espacio filosófico abismal porque la materia deja de ser "bloque" y se vuelve "campo de potencialidades". La causalidad deja de ser rígida y se vuelve probabilística. El mundo visible depende de estructuras invisibles de posibilidad. Lo cuántico es un ejemplo científico de cómo lo invisible sostiene lo visible. No es misticismo. Es física. *"La cuántica no describe el azar, sino el territorio de lo posible. La materia no es un objeto, sino un conjunto de posibilidades que, bajo ciertas condiciones, se actualizan*." El azar es solo la superficie. La posibilidad es la arquitectura profunda. Posiblemente estemos viendo la cuántica sin la carga matemática, sin la jerga, sin la intimidación intelectual, desde la simple pregunta de "qué es la materia en su raíz". No hemos liberado de ecuaciones y nos hemos aproximado a una forma de ser del mundo y nos hemos quedado con la idea que la materia no es un bloque, sino un abanico de posibilidades que se actualizan. Debemos entenderla como ontología de lo posible pues la cuántica no es un caos incomprensible, sino un orden de posibilidades que sostiene lo real. Comprenderla no exige fórmulas, sino una mirada capaz de ver lo invisible como hemos intentado describir en esta obra.

# 14. ANEXO III El chip. Las nuevas aplicaciones digitales

El electrón y el chip son los dos conceptos clave, el hilo conductor que nos conduce hasta los instrumentos tecnológicos que tanto utilizamos hoy y de los que tanto dependemos. Es más, podríamos intuir que la electrónica parece que va a continuar evolucionando y seguirá marcando el nuevo futuro. La comunicación y el cálculo han sido siempre el núcleo de la evolución humana y lo seguirá siendo. La introducción del “alfabeto” no llegó hasta después de dos milenios de existencia de la humanidad y la escritura o la idea del libro impreso y hasta que se empezó a reproducir en serie con la técnica de Gutenberg requirió otros siete siglos. “El desarrollo del telégrafo, la telefonía y la radio tuvo lugar cuatro siglos después; desde ahí a la transición al uso de impresoras conectadas a un ordenador transcurrieron unos cien años; pero la popularización de las impresoras personales solo ha necesitado menos de cincuenta años. Más aún, el siguiente paso, que ha sido la universalización de las comunicaciones interpersonales —las redes sociales—se ha dado en menos de una década. Sin duda, algo está cambiando y este algo afecta de manera significativa a nuestro modo de vida y, sobre todo, a nuestro ritmo de asimilación de cambios.

Yo he contado que soy de la generación del “trillo” que se usaba ya en los tiempos bíblicos de Job. Yo pasé muchos veranos encima de un trillo para moler la paja y separar de la espiga del grano. Hoy una cosechadora lo hace en un instante y el conductor lleva su aire acondicionado, radio y televisión, luces potentes para trabajar de noche y sin apenas esfuerzo y sudor. Los primeros instrumentos

destinados a ayudar al hombre a realizar operaciones algebraicas se remontan a unos cinco mil años atrás, a la invención del ábaco en Babilonia. Modificaciones sucesivas entre el 800 y el 1300 de nuestra era llevaron a producir el modelo que conocemos actualmente. No es hasta mediados del siglo XVII que Pascal construye la primera máquina mecánica de calcular. Posteriormente, Leibnitz, Hahn, Stanhope o Mueller construyen diferentes tipos de máquinas calculadoras que se suceden en el tiempo entre 1674 y 1786. Pero es en el siglo XIX cuando Babbage consigue realizar los primeros prototipos de calculadores mecánicos realmente interesantes, aunque no logra su total operatividad. Ya en la primera mitad del siglo XX, se desarrolla una amplia actividad para conseguir un calculador electromecánico; Leonardo Torres Quevedo, Vannevar Bush, George Stibitz, Konrad Zuse o John V. Atanasoff ponen en funcionamiento prototipos operacionales que pueden considerarse antecesores inmediatos de los computadores electrónicos.[52]

Como podemos ver la evolución ha sido lenta pues han pasado cinco milenios desde el “ábaco” a sistemas menos automáticos. Seria en 1946 cuando apareció el primer ordenador completamente electrónico y la velocidad a la que se ha incrementado nuestra potencia de realizar operaciones —y no solo las más sencillas— ha sido exponencial. En apenas setenta años, hemos aumentado en muchos órdenes de magnitud nuestra capacidad operativa. Para la fecha de 1975 ya se habían producido grandes avances en el campo de los computadores u ordenadores habiéndose desarrollado el concepto de “sistema operativo” y habían aparecido lenguajes de computación o informáticos como FORTRAN (1957), BASIC (1964),

[52] *Del electrón al chip*. Gloria Huertas Sánchez, Luisa Huertas Sánchez, José L. Huertas Díaz

PASCAL (1971) o C (1974). También estaba ya disponible un sistema operativo que terminará convirtiéndose en un estándar; nos referimos a UNIX, debido a Bell Labs e introducido en 1969. Igualmente había irrumpido en el mercado la primera calculadora programable de bolsillo (Hewlett-Packard, 1974). Las dificultades para diseñar ordenadores portátiles se debían a la tecnología que se debía usar para el teclado, el video, los discos, las baterías en pequeño tamaño y en general del almacenamiento masivo. Irían apareciendo novedades como los cristales líquidos o los Led para pantallas. El almacenamiento a gran escala y, sobre todo, la capacidad de poder guardar de forma cómoda es otro de los retos que se tuvieron en cuenta en ese periodo. Habían nacido así los grandes sistemas de almacenamiento en cinta magnética que se emplearon desde comienzos de los años cincuenta y que culminaron con el *floppy* o disquete, un disco magnético regrabable de pequeño tamaño, introducido en 1970 por IBM y que permitía a cada usuario mantener de forma cómoda datos y programas fuera del ordenador. Muchos de nosotros recordamos estas aventuras de la electrónica, donde aprendimos el Basic y pudimos llevar una contabilidad oficial de un negocio con un disquete de 1,5mg

Pero no solo queremos fijarnos en el tema de la vertiente informática que permite utilizar eficazmente los computadores, sino referirnos a los *chips* con los que están construidos y que han contribuido a su evolución. Reducir el tamaño de los transistores, componentes básicos elementales de los circuitos integrados, era un punto fundamental. La partida más gravosa correspondía al proceso de fabricación en sí mismo. La mejor manera de reducir costes se demostró que debía basarse en compartir gastos entre todos los chips que se fabricaban en una misma hornada. Mientras más chips

se fabricasen simultáneamente, más barato saldría el precio unitario. Las técnicas de producción de chips, basadas en un procedimiento físicoquímico llamado fotolitografía, era muy similar en esencia a los procesos fotográficos y a los de grabado. Las capas que se van superponiendo corresponden a modificaciones del semiconductor de base organizadas en lo que se conoce como proceso epitaxial. Este se debe a Eric O. Ernst, Donald J. Hurd y Gerard Seeley, quienes la patentaron en 1965 para IBM los chips para que quepan más en el mismo espacio. Eso implica pasos sucesivos de proceso que requieren unos hornos con temperatura estabilizada y unas condiciones ambientales muy estrictas. Este procedimiento de fabricación tiene lugar empleando como base un sustrato u “oblea” de materia semiconductor adecuadamente limpio y pulido, cuyo espesor es de algunos cientos de micras. En cada hornada se trabaja con un número determinado de obleas que viene condicionado por la capacidad de los hornos.

En 1975, el tamaño máximo de oblea usado por la industria correspondía a un diámetro de 100 mm; hoy día ese diámetro se ha aumentado hasta los 450 mm. Otra manera de aumentar el número de circuitos por oblea es hacerlos más pequeños. Aprovechando el concepto de fotolitografía, se ha ido tratando de reducir las dimensiones de los componentes —fundamentalmente de los transistores—jugando a una reducción óptica de los patrones dibujados en el semiconductor. Desde el Intel 4004 de 1971, constituido por unos 2.300 transistores hasta los modernos microprocesadores multinúcleo como, por ejemplo, la tercera generación del Intel Core Processor, introducida en 2012, que incluye más de mil millones de transistores, el salto es abismal. En 1975 comenzaban a aparecer las memorias de 4 Kbits, mientras que ahora

los chips de memoria de 4 GBits abundan en el mercado. Si tenemos en cuenta el precio actual, resulta que el bit de memoria flash puede costar en una tienda la diezmilésima parte de un euro. Con un ritmo de cambio tan elevado, no es posible seguir paso a paso todos y cada uno de los hitos de esa evolución.

En la década de 1980 estalló la que suele denominarse “guerra de los microprocesadores”, que terminó con la mayoría de los fabricantes y se concentró finalmente en dos bandos bien definidos: Intel contra Motorola, del que resultó triunfante la primera. Al avance en la integración de procesadores y memorias hay que añadir la invención de nuevas técnicas de almacenamiento masivo magnético y óptico que han dado lugar a complementos tan útiles y utilizados como los DVD, discos Blu-Ray o tarjetas de memoria y USB. ¿Y la telefonía celular?, ¿no tiene la electrónica un papel en ella? ¿También es totalmente digital? Es cierto que las comunicaciones seguían configurando una vertiente importante en el mundo de las tecnologías electrónicas. El viejo concepto de la telefonía a través de hillos se quería reemplazar por una comunicación más cercana a la radio, conservando la marcación alfanumérica e iría madurando el concepto de telefonía celular. Pero era necesario resolver los problemas electrónicos para posibilitar nuevos terminales telefónicos. La telefonía “clásica” conecta terminales (auricular + micrófono) por medio de una red de cables cuya conexión controlan las centrales telefónicas. En la “nueva” telefonía se pretendía eliminar los cables y dotar al terminal (en este caso, un comunicador por radio) de la misma facilidad de conexión, pero, lógicamente, sin cables. La solución encontrada consistía en la instalación de una red de antenas que cubren el territorio y que —usando ordenadores para ello— permiten establecer la conexión entre dos o más abonados con

independencia de dónde se encuentren ambos abonados. Desde luego, ese despliegue de antenas ha exigido además desarrollos tecnológicos nuevos relacionados con la naturaleza electromagnética de la transmisión y ha obligado a importantes inversiones a nivel mundial. Ya el cine y los comics habían predicho que el móvil existiría desde que en 1946 Dick Tracy usó por primera vez su teléfono de muñeca y Batman empleó su batphone en la serie de televisión de 1966 y el Superagente 86 (Maxwel Smart) se comunicaba por medio de su zapatófono desde 1965. Hoy día estas antenas forman parte del paisaje de cualquier lugar.

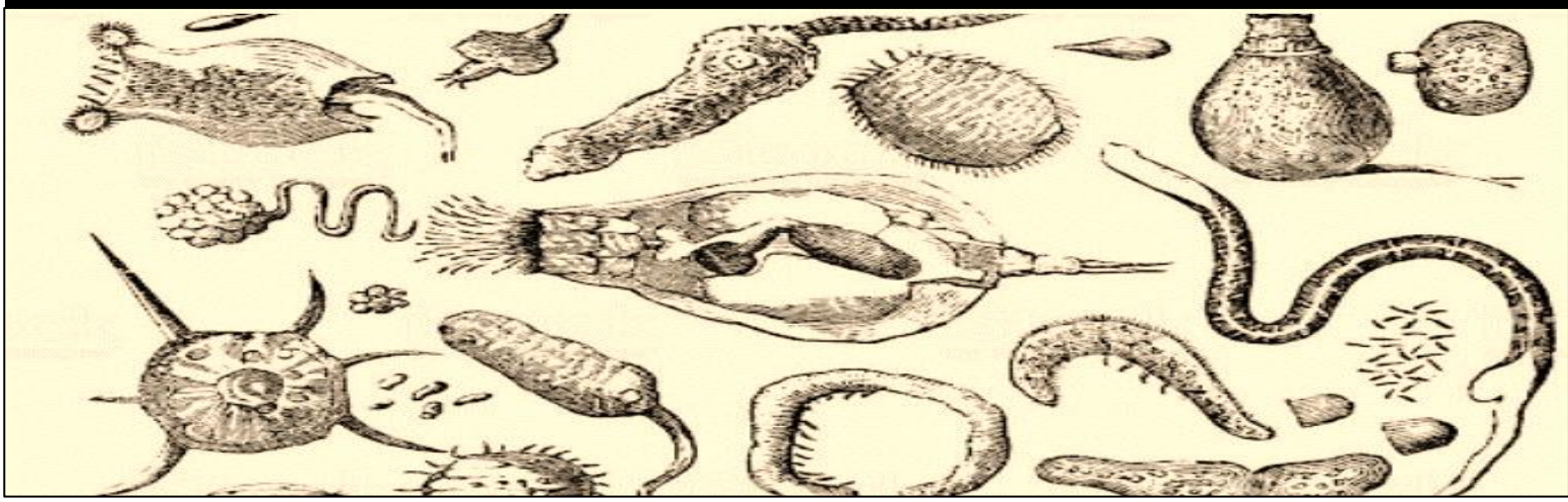
Eliminados los cables, se hacía necesario recurrir a baterías que se pudiesen recargar cómodamente; el peso y el volumen del terminal deberían ser pequeños y, por supuesto, ya que los procesadores se estaban demostrando tan versátiles, idear maneras de que pudieran servir también a hacer atractivos los nuevos teléfonos. No se trataba de una limitación electrónica, pero era un condicionante importante. A finales de la década de 1970 y, sobre todo, en la década siguiente, diversos departamentos universitarios realizaron un gran esfuerzo por posibilitar la integración de esos componentes no digitales en tecnologías MOS y CMOS, para compatibilizar tales componentes con el mundo digital. Cabe citar, sobre todo, el trabajo de George S. Moschytz en el ámbito de filtros activos y el de Alfred Fettweis, que se anticiparía a su tiempo combinando técnicas analógicas y digitales. A partir de 1980, en la Universidad de California en Berkeley se comenzó a considerar una aproximación “híbrida” en la que se empleaban componentes analógicos (incluidos transistores de mayor tamaño y construidos de forma diferente) combinándolos con transistores digitales usados como conmutadores. Nació así la técnica de “condensadores

conmutados". Por ejemplo, un simple condensador de 1 nF (la mil millonésima parte de un faradio) podía ocupar la mima superficie que un millar de transistores. De esta forma, la nueva telefonía no podía trabajar en las bandas comerciales de radio sino en frecuencias mucho más altas. Esto implicaba un reto mayor a los circuitos que debían formar parte de los elementos de recepción y transmisión. En realidad, la evolución de la telefonía móvil es la historia de una evolución en el rango de frecuencias útiles para aumentar las capacidades y la velocidad de transmisión.

A comienzos de los años noventa, comenzó a cristalizar un gran esfuerzo investigador en diferentes centros entre los que cabe destacar la Universidad Católica de Leuven, en Bélgica, o el CSEM, en Suiza. Versiones verdaderamente analógicas de los diferentes subsistemas que se precisan para convertir las señales de radiofrecuencia y la información que portan fueron generándose de manera muy eficiente. Sin embargo, estos antecesores solo permitían la comunicación de audio entre dos terminales. A partir de 2001 estuvo disponible la tercera generación, 3G, que ya da soporte a auténticas plataformas multimedia que incluyen voz, correo electrónico, explorador de internet, videojuegos, GPS, etc. Esta nueva generación tiene un mayor ancho de banda que permite mayores velocidades de descarga. Mejores prestaciones se consiguen con la tecnología 4G actual y, por supuesto, se espera poder introducir una nueva —la 5G— que ya tenemos en nuestros móviles. El primer país con una infraestructura de antenas terrestres adecuada fue Japón, en 1979; le siguieron los países nórdicos en Europa (1981). El primer teléfono patentado y comercializado fue el DynaTAC de Motorola. Su peso era de 790 g, medía 25 cm de longitud (sin contar la antena plegable), y se puso en el mercado con

un precio de 4.000 dólares. Comparado con las dimensiones de un S5 de Samsung, por ejemplo, que pesa 145 g y mide 14 cm, podemos hacernos una idea del grado de complejidad que un teléfono móvil tiene: *Antenas* (de radio, de GPS, de Blue Tooth, de wifi), *Pantalla* (cristales líquidos o LED en color que precisa de un circuito que lo conecta con los otros subsistemas del teléfono y puede ser, en muchos casos, activado al tocar su superficie, como en una PDA). *Sebsores-actuadores* (micrófono, altavoz, teclado y vibrador). *Subsistema de radio*: Es un proceso de modulación-demodulación relativamente similar a los usados en radio convencional cuyo objetivo es "bajar" la frecuencia de las señales que contienen la información (voz, audio, vídeo). Memoria: la complejidad actual exige el empleo diferentes formas de memoria integrada (SRAM, ROM), así como memorias externas (tipo flash) para aumentar la capacidad de almacenaje de fotos, vídeos, ficheros en general y, por supuesto, la información que identifica al usuario.

Además de esto, hay que considerar los componentes software que incluyen el sistema operativo y las múltiples aplicaciones que todos conocemos y usamos (WhatsApp es un buen ejemplo). Con este nivel de complejidad no cabe duda que un teléfono móvil es uno de los objetos más elaborados que el hombre ha construido y, casi con seguridad, el que mayor número de componentes/aplicaciones contiene por unidad de volumen. El número de transistores que puede contener un terminal de última generación se mide en miles de millones, combinando tecnologías tan diversas como las que hemos puesto de manifiesto más arriba. A esto hay que añadir que el número de terminales en uso hace tiempo que superó los mil millones, lo que refleja la importancia económica —además de la sofisticación tecnológica— que la electrónica ha alcanzado. Y, por

supuesto, todo ello ha conllevado un cambio drástico en las costumbres sociales y personales, un cambio con elementos muy positivos pero que combina otros altamente negativos como, por ejemplo, la excesiva dependencia del móvil que se ha convertido en elemento esencial del que muchas personas no son capaces de separarse.

Anton van Leeuwenhoek (El primer microscopio 1747)